Institut für Parallele und Verteilte Systeme

Abteilung Verteilte Systeme

Universität Stuttgart
Universitätsstraße 38
D - 70569 Stuttgart

Diplomarbeit Nr. 2316

Energieschonung im Lokationsmanagement

Ralph Lange

Studiengang:	Informatik
Prüfer:	Prof. Dr. rer. nat. Dr. h. c. Kurt Rothermel
Betreuer:	Dipl.-Inf. Tobias Drosdol
begonnen am:	18. Februar 2005
beendet am:	6. September 2005
CR-Klassifikation:	C.2.4, C.4, H.3.3, H.3.4

Abstract

For context-aware computing, position is an important aspect. Usually the mobile objects fix position on their own. A central instance called location service manages the position data. Transmitting latest position data to the location service is called position update. The location service uses the position data to answer queries on the positions of mobile objects.

Often this implies that the mobile objects regularly fix and update position. Therefore they spend a lot of energy, which decreased the availability time of mobile devices. Existing approaches to save energy only reduce the number of position updates. In order to minimize the energy consumption the number of position fixes and updates has to be adapted to the actual demand of the queries.

First of all the query interface of the location service is analyzed in this work. The query interface is enhanced so that an inquiring application can specify its actual demand precisely. This implies research on continuous queries as well as on temporal and spatial tolerance.

Afterwards it is shown how the number of position fixes can be minimized for a given query and tolerance. Starting from that, the energy consumption is minimized. Several approaches are developed for processing queries efficiently. Normally the queries have to be processed by the location service and the inquired mobile objects together.

Detailed simulations fortify the theoretical results. An all new approach to process range queries is put to test with promising results.

The final result of this work is that there are a lot of possibilities to save energy in location management, thus increasing the availability time of mobile devices.

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung **1**

1.1 Lokationsmanagement 1
1.2 Motivation 3
1.3 Hintergrund 4
1.4 Aufbau dieser Arbeit 5

2 Grundlagen **7**

2.1 Lokationsmanagement 7
2.2 Mobilkommunikation 8
2.3 Positionsbestimmung 11
2.4 Mobile Objekte 20
2.5 Lokationsdienst 20
2.6 Anfragen und Ereignisse 22
2.7 Allgemeine Positionsübermittlung 25
2.8 Positionsübermittlung bei kontinuierlichen Gebietsanfragen 28
2.9 Systemmodell 30

3 Problemstellung **33**

3.1 Energieverbrauch zum Lokationsmanagement 33
3.2 Bewertung existierender Arbeiten 34
3.3 Lösungsidee zur Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen 36
3.4 Offene Fragen 37

4 Erweiterung der Anfrageschnittstelle **39**

4.1 Kontinuierliche Anfragen 39
4.2 Toleranz 40
4.3 Zeitliche Toleranz 41
4.4 Räumliche Toleranz 42
4.5 Genauigkeit und räumliche Toleranz 43
4.6 Kombination beider Toleranzen 46

5 Verarbeitung von Positionsanfragen **49**

5.1 Diskrete Positionsanfragen 49
5.2 Kontinuierliche Positionsanfragen 50
5.3 Zeitliche Toleranz bei kontinuierlichen Positionsanfragen 51
5.4 Räumliche Toleranz bei kontinuierlichen Positionsanfragen 52
5.5 Vergleich der Toleranzen bei kontinuierlichen Positionsanfragen 59
5.6 Hohe Anfragelast 60

6 Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen 63
6.1 Minimale Zahl an Positionsbestimmungen . . . 63
6.2 Minimale Zahl an Positionsübermittlungen . . . 65
6.3 Lösungsraum . . . 67
6.4 Auffordern zur Positionsbestimmung . . . 71
6.5 SafeRegions . . . 72
6.6 Anfragen Mitteilen . . . 73
6.7 Grid-Verfahren . . . 76
6.8 Vergleich der Verfahren . . . 79

7 Simulation 81
7.1 Zielsetzung . . . 81
7.2 Architektur der Simulationsumgebung . . . 82
7.3 Minimale Zahl an Positionsbestimmungen bei Gebietsanfragen . . . 87
7.4 Energieverbrauch berichtender Protokolle bei räumlicher Toleranz . . . 88
7.5 Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen . . . 93
7.6 Minimaler Energieverbrauch beim Grid-Verfahren . . . 97

8 Zusammenfassung und Ausblick 101
8.1 Zusammenfassung und Bewertung . . . 101
8.2 Ausblick . . . 102

Literaturverzeichnis 105

A Mathematische Analysen 115
A.1 Energieverbrauch beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll . . . 115
A.2 Hohe Anfragelast durch diskrete Positionsanfragen . . . 116
A.3 Gleichverteilt gewählte Geschwindigkeit auf konstanter Entfernung . . . 117

B Details zur Simulation 119
B.1 Parameter für einen Simulationslauf in XML . . . 119
B.2 Ergebnisse eines Simulationslaufes . . . 120
B.3 Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen . . . 120

Abbildungsverzeichnis

1.1 Die Architektur von Nexus nach [NGS+ 2001] 5

2.1 Schematischer Aufbau des Lokationsmanagements 8
2.2 Infrastrukturnetz mit Lokationsdienst 9
2.3 Wichtige drahtlose Kommunikationsstandards 9
2.4 Vier Techniken zur Positionsbestimmung 12
2.5 Zweidimensionale Dichtefunktionen zur Beschreibung der Genauigkeit 13
2.6 Aktive und passive mobile Objekte nach [SBGP 2004] 14
2.7 Einschaltdauer des Hochfrequenzverstärkers eines GPS-Empfängers 17
2.8 Verteilter, skalierbarer Lokationsdienst nach [Leo 2003] 21
2.9 Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei Gebietsanfragen 25
2.10 SafeSphere und SafeRect 29
2.11 Gebietsanfragen und SafePeriods in einem Gitternetz 30
2.12 Möglicher Aufenthaltsbereich begrenzt durch $\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ 31

3.1 Mögliche Aufenthaltsbereiche am Rand eines angefragten Gebiets 36
3.2 Positionsbestimmungen beim Betreten eines angefragten Gebiets 37

4.1 Räumliche Toleranz bei einer Positionsanfrage 42
4.2 Räumliche Toleranz bei einer Gebietsanfrage 43
4.3 Räumliche Toleranz und Genauigkeit kombiniert bei einer Positionsanfrage . . 44
4.4 Genauigkeit beim Betreten eines angefragten Gebiets 44
4.5 Toleranz durch Genauigkeitsintervall beschrieben 45
4.6 Toleranz abzüglich der maximalen Abweichung 46

5.1 Positionsbestimmungsrate beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll . . 53
5.2 Kreisring, in dem Positionsübermittlung erfolgen sollte 55
5.3 Leistungsaufnahme beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll 56
5.4 $r_{i'}$ und $r_{i'-0,5}$ in Abhängigkeit von v 58

6.1 Gebietsanfrage mit Toleranzstreifen und möglichen Aufenthaltsbereichen . . . 65
6.2 Lösungsraum bei verteilter Verarbeitung kontinuierlicher Gebietsanfragen . . 71
6.3 Grid mit einer Gebiets- und einer Gebietspositionsanfrage 76

7.1 Architektur der Simulationsumgebung 82
7.2 Dichtefunktion der Zipf-Verteilung 83
7.3 Im Mobilitätsmodell verwendete Straßen Midtown Manhattans 85
7.4 Screenshot während eines Simulationslaufes 86
7.5 Anzahl der Positionsbestimmungen bei dauerhaften Gebietsanfragen 88
7.6 Entfernungsbasierte Positionsübermittlung nach Energiekostenverhältnis . . . 90
7.7 Entfernungsbasierte Positionsübermittlung nach Toleranz 90
7.8 Entfernungsbasierte Positionsübermittlung nach Geschwindigkeit 91
7.9 Entfernungsbasierte Positionsübermittlung abhängig von $i' - 0{,}5$ 92

7.10 Koppelnavigation nach Energiekostenverhältnis 92
7.11 Koppelnavigation nach Geschwindigkeit 93
7.12 Anzahl der Positionsbestimmungen bei langlebigen Anfragen 94
7.13 Anzahl der Positionsübermittlungen bei langlebigen Anfragen 95
7.14 Anzahl der Nachrichten bei langlebigen Anfragen 95
7.15 Energieverbrauch der mobilen Objekte bei langlebigen Anfragen 96
7.16 Anzahl der Nachrichten bei kurzlebigen Anfragen 96
7.17 Energieverbrauch der mobilen Objekte bei kurzlebigen Anfragen 97
7.18 Anzahl der Positionsbestimmungen bei Grid-Verfahren 97
7.19 Anzahl der Positionsübermittlungen bei Grid-Verfahren 98
7.20 Anzahl der Nachrichten bei Grid-Verfahren 99
7.21 Energieverbrauch der mobilen Objekte bei Grid-Verfahren 99

8.1 Möglicher Aufenthaltsbereich in einem Straßennetz 103

Tabellenverzeichnis

6.1 Ansätze für Gebiets- und Gebietspositionsanfragen im Vergleich 80

7.1 Typische Parameterbelegung in den Simulationsläufen 87

1 Einführung

Um das Thema dieser Arbeit zu erläutern werden Ortsbezug und Lokationsmanagement an Hand von Beispielen erklärt. In Abschnitt 1.2 wird die Motivation für diese Arbeit dargelegt und anschließend der Rahmen genannt, in dem sie entstanden ist. In Abschnitt 1.4 wird ein Überblick über die nachfolgenden Kapitel gegeben.

1.1 Lokationsmanagement

Ortsbezogene Anwendungen und Dienste unterliegen einer rasanten Entwicklung. Zur Diensterbringung werten sie Positionsdaten über Benutzer und Objekte aus.

Das bekannteste und älteste Anwendungsgebiet ist die Navigation. Die meisten Navigationssysteme verwenden zur Positionsbestimmung das Global Positioning System [GPS]. Mit Hilfe der kostenlos verfügbaren Signale der GPS-Satelliten kann ein kleiner Empfänger die eigene Position auf wenige Meter genau bestimmen. Ein Computer mit entsprechender Software und Kartendaten kann diese Position visualisieren und in Echtzeit Anweisungen geben, die den Anwender sicher zu einem vorgegebenen Ziel führen.

Navigationssysteme sind in den vergangenen Jahren ständig weiterentwickelt worden. Kartendaten für den Straßenverkehr können inzwischen von einer Telematikzentrale dynamisch an Verkehrslage, Staus und Baustellen angepasst werden [Mot 2001, Seite 17]. Die zur Erstellung der Kartendaten benötigten Informationen kann die Telematikzentrale mit dem Floating Car Data-System von entsprechenden Messgeräten an Bord einiger ausgewählter Fahrzeuge erhalten.

Daimler-Chrysler hat in Luxusautos einen automatischen Notruf installiert. Erkennt das an die Sensoren der Airbags gekoppelte System einen Unfall, so übermittelt es die zuletzt vom Navigationssystem bestimmte Position an eine Notrufzentrale [Mot 2001, Seite 15].

Was in Europa eine besondere Ausstattung in Autos ist, wurde den Mobilkommunikationsanbietern in den USA gesetzlich vorgeschrieben: Bei jedem Notruf muss die Position des Anrufenden auf wenige hundert Meter genau bestimmt und an die Notrufzentrale übermittelt werden [E911].

Solche ortsbezogenen Dienste der Mobilkommunikationsanbieter werden Location-Based Services, kurz LBS, genannt. Die Positionsbestimmung erfolgt mit Hilfe der Basisstationen der Mobilkommunikationsnetze. Die mobilen Endgeräte, im Wesentlichen Mobiltelefone und PDAs (Personal Digital Assistant), benötigen keine zusätzliche Ausstattung. In den vergangenen zwei Jahren wurden damit eine Reihe ortsbezogener Dienste entwickelt.

Vodafone bietet den Dienst „Friendzone“ [Vod 2003], mit dem ein Teilnehmer die Position seiner Freunde jederzeit per SMS (Short Message Service) erfragen kann – natürlich nur, wenn diese ihr Einverständnis gegeben haben. Die Kunden von T-Mobile können mit dem Dienst „In der Nähe“ [T-M 2005] per SMS die Entfernung und Adresse des nächsten Geldautomaten, Restaurants, Kinos und Ähnlichem erfragen.

Doch Navigation mit GPS und Location-Based Services der Mobilkommunikationsanbieter sind erst der Beginn in der Entwicklung ortsbezogener Anwendungen und Dienste. Professor Vidal Ashkenazi hat die Zukunftsvision in einem Interview zum europäischen Positionsbestimmungssystem Galileo so beschrieben [Gal 2004]: „Wie die Zeit gegenwärtig das normale

Leben beeinflusst, so künftig auch Positionsdaten und deren ständiges Übermitteln an andere.“[1]

Das entsprechende Forschungsgebiet wird Location-aware Computing genannt und bildet ein wichtiges Teilgebiet des Context-aware Computings. Letzteres „beschreibt die besondere Fähigkeit einer informationsverarbeitenden Infrastruktur, den Kontext der sie real umgebenden Welt zu erkennen und darauf zu reagieren“[2] [PMP 2003, Seite 81]. Die wichtigsten Kontextinformationen sind Identität, Zeit und Position. Aus diesen drei Kontextinformationen kann teilweise auf andere geschlossen werden – zum Beispiel in einer Wohnung aus Zimmer und Tageszeit auf die Aktivität des Besitzers. Morgens im Bad und mittags in der Küche ist dies besonders einfach.

Ein kleiner Ausschnitt der Anwendungsmöglichkeiten des Location-aware und des Context-aware Computings lässt sich an einem Stadtrundgang demonstrieren. Dabei, ein kleiner tragbarer Computer, der mit GPS-Empfänger ausgestattet ist. Das Gerät zeigt auf einer Karte stets die eigene Position an und führt sicher zu jedem gewünschten Ort:

> Von der aktuellen Position aus schlägt es einen Rundgang vor, der auf kürzestem Weg an den Sehenswürdigkeiten der Stadt vorbei führt. Zunächst geht der Weg durch die Einkaufspassage der Stadt. Vor einer Apotheke signalisiert der Computer: „Hier gibt es die Sonnencreme Ihrer virtuellen Einkaufsliste im Angebot.“
>
> Eine Sonnencreme wäre zunächst nicht nötig gewesen, denn vom lokalen Internet-Wetterdienst wird der Computer über ein heraufziehendes Gewitter informiert. Entsprechend schlägt er einen kleinen Abstecher in ein nahe gelegenes Museum vor. Die Liste der angebotenen Museen lässt sich nicht nur nach der Entfernung vom momentanen Standort, sondern auch nach den eigenen Vorlieben sortieren. Da der Computer weiß, dass sein Benutzer ein Kunstliebhaber ist, steht die Kunsthalle ganz oben.
>
> „Museum – heute nicht“, so der eigene Beschluss. In der Rubrik Unterhaltung lassen sich nahe gelegene Kinos anzeigen. Ein neuer Science-Fiction-Film interessiert besonders. Das passende Kino liegt etwas entfernt und der Kinosaal ist auch für eine Nachmittagsvorstellung recht klein. „Ob ich wohl noch eine Eintrittskarte bekomme, bis ich das Kino erreiche?“ Vorbestellungen sind 30 Minuten vor Beginn der Vorstellung nicht mehr gestattet.
>
> Erfahrungsgemäß trägt die Hälfte aller Kinobesucher ein Mobiltelefon mit präzisem Positionsbestimmungssystem bei sich und hat das anonyme Zählen über ein Menü Sicherheit und Privatsphäre explizit gestattet. Der Lokationsdienst, der die Positionen aller entsprechend ausgestatteten Geräte verwaltet, übermittelt die Zahl der momentan erfassten Teilnehmerinnen und Teilnehmer vor dem Kino an dessen Internet-Rechner. Entsprechend mit Zwei multipliziert wird diese Zahl im Internet veröffentlicht. „Nur rund 20 Personen warten am Kino. Da bekomme ich noch eine Eintrittskarte.“ Und, so weit ist es gar nicht – es sind nur 1,73 Kilometer ...

In der Forschung zum Location-aware Computing wird, neben möglichen Anwendungsgebieten sowie genauer und kostengünstiger Positionsbestimmung, vor allem die Verwaltung

[1] „And just like time governs at present the lifes of ordinary citizens so will position and its instant communication to others.“

[2] „Context-aware computing describes the special capability of an information infrastructure to recognize and react to a real-world context.“

von Positionsdaten untersucht. Existierende kommerzielle Datenbanken für räumliche Daten haben sich wegen der hohen Aktualisierungsraten durch ständig neue Positionsdaten als unzureichend erwiesen. Erste Forschungsergebnisse sind hochskalierbare Lokationsdienste, im Englischen Location Services genannt, die Millionen Objekte und deren jeweilige Position verwalten können.

Ein Lokationsdienst soll einheitlichen Zugriff auf Positionsdaten bieten, die aus verschiedenen Quellen stammen können. Der Zugriff muss zum Schutz der Privatsphäre explizit geregelt werden. Über eine standardisierte Anfrageschnittstelle soll ein Lokationsdienst auch komplexe Anfragen beantworten können, wie zum Beispiel das Zusammentreffen mehrerer Personen oder Objekte in einem bestimmten Gebiet.

Das Gesamtsystem, von der Positionsbestimmung über die Speicherung und Verwaltung der Positionsdaten bis hin zur Anfrageschnittstelle, wird Lokationsmanagementsystem genannt.

1.2 Motivation

Die meisten existierenden ortsbezogenen Anwendungen verwenden und verwalten nur die Positionsdaten des eigenen Geräts. Bei Bedarf kann die Position an einen entsprechenden Dienst übermittelt werden.

Für neue Dienste und Anwendungen werden Lokationsmanagementsysteme benötigt, bei denen die Positionsdaten zentral von einem Lokationsdienst verwaltet werden.

Einem mobilen Endgerät ist in einem Lokationsmanagementsystem zunächst nicht bekannt, wann seine Position tatsächlich benötigt wird. Existierende Lokationsdienste gehen oft davon aus, dass sie regelmäßig über die Positionen der mobilen Objekte – so die allgemeine Bezeichnung für mobile Endgeräte und die Personen oder Gegenstände, die sie repräsentieren – informiert werden.

Ein wichtiges Problem ist der Energieverbrauch der mobilen Objekte für die Positionsbestimmung und die Übermittlung der Positionsdaten an den Lokationsdienst. Dies gilt vor allem für kleine tragbare Geräte, deren Energievorrat zur allgemeinen Akzeptanz im normalen Betrieb mehrere Tage ausreichen sollte.

Die Forschung ist bemüht, den Energieverbrauch für Positionsbestimmung und -übermittlung zu reduzieren. Wichtige Ansätze sind:

- *Energieeffiziente Positionsbestimmung:* Die zur Positionsbestimmung benötigten Empfänger wurden in den vergangenen Jahren stark verbessert. Sie bieten ständig höhere Genauigkeiten bei geringerem Energieverbrauch durch Miniaturisierung der empfindlichen Sensoren und Signalverstärker.

- *Periodische und variable Positionsbestimmung:* In der Vergangenheit bot der wichtigste Vertreter heutiger Positionsbestimmungssysteme – GPS – nur kontinuierliche Positionsbestimmung mit ständig eingeschaltetem Hochfrequenzverstärker. Inzwischen wurden eine Reihe von Modi entwickelt, bei denen die Position nur periodisch und nach Aufforderung mit besonders geringem Energieverbrauch bestimmt wird.

- *Energieeffiziente Mobilkommunikation:* Häufig werden die Positionsdaten direkt bei den mobilen Objekten ermittelt und müssen mit Mobilkommunikation an den Lokationsdienst übermittelt werden. Die Forschung und die Mobilkommunikationsanbieter sind bemüht, die Hardware und die Kommunikationsprotokolle so energieeffizient wie möglich zu gestalten.

- *Koppelnavigationsprotokolle zur Positionsübermittlung:* In der Forschung wurden aufwändige Algorithmen zur Erkennung typischer Bewegungsmuster entwickelt. Auf Basis dieser Algorithmen kann der Lokationsdienst künftige Bewegungen eines mobilen Objekts vorhersagen. Eine Positionsübermittlung ist nur bei Abweichungen von der vorgesagten Bewegung nötig. Die Zahl der Positionsübermittlungen kann mit diesem Vorgehen erheblich reduziert werden.

- *Bedarfsgerechte Positionsübermittlung:* Seit wenigen Jahren werden Verfahren diskutiert, bei denen der Lokationsdienst die mobilen Objekte über den durch Anfragen entstandenen Informationsbedarf informiert und diese ihre Positionsübermittlungen daran anpassen.

Intention der meisten Arbeiten zur bedarfsgerechten Positionsübermittlung ist die Schonung der Übertragungskapazität des Kommunikationssystems und der Rechenkapazität des Lokationsdienstes. Obwohl teilweise auch die Schonung des Energievorrats der mobilen Objekte genannt wird, setzen die meisten Verfahren periodische oder ständige Positionsbestimmung voraus. Das Potential zur Energieschonung, durch Anpassung an den tatsächlichen Informationsbedarf, wird bei weitem nicht ausgeschöpft.

In dieser Arbeit wird untersucht, wie der Energieverbrauch der mobilen Objekte durch bedarfsgerechte Positionsbestimmung und -übermittlung insgesamt minimiert werden kann. Die zentralen Fragen sind:

- Welche Informationen benötigen die mobilen Objekte für bedarfsgerechte Positionsbestimmung und -übermittlung?

- Wie kann der Lokationsdienst diese Informationen von den Anwendungen erhalten und sie an die mobilen Objekte geeignet weiterleiten?

- Welche Verfahren eignen sich zur Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen und wie kann der Energieverbrauch eines mobilen Objekts damit insgesamt minimiert werden?

1.3 Hintergrund

Diese Arbeit ist im Rahmen von Nexus entstanden, einem interdisziplinären Sonderforschungsbereich an der Universität Stuttgart [Nexus].

Ziel des Sonderforschungsbereichs ist die Entwicklung von Umgebungsmodellen für mobile kontextbezogene Systeme. Nexus vereinigt verschiedene statische Umgebungsmodelle [NGS+ 2001, NM 2001], wie Straßenkarten oder dreidimensionale Gebäudepläne, zu digitalen Weltmodellen, auf deren Basis Kontextparameter interpretiert werden können.

Die im Rahmen von Nexus entwickelte Plattform für mobile kontextbezogene Systeme ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Zentrale Bedeutung hat die Föderationsschicht. Sie bietet Anwendungen und Diensten einheitlichen Zugriff auf Umgebungsmodelle, Positionsdaten mobiler Objekte und Systemdienste, indem sie diese zu einem angereicherten Umgebungsmodell – dem Augmented World Model – zusammenfasst. Eine Beispielanwendung auf Basis dieser Plattform ist NexusScout [NGS 2003].

Als Forschungsprojekt zum Context-aware Computing wird in Nexus auch das Lokationsmanagement intensiv untersucht. In [Leo 2003] wird die Architektur eines geeigneten Lokationsdienstes beschrieben. Für den großflächigen Einsatz der Nexus-Plattform muss der

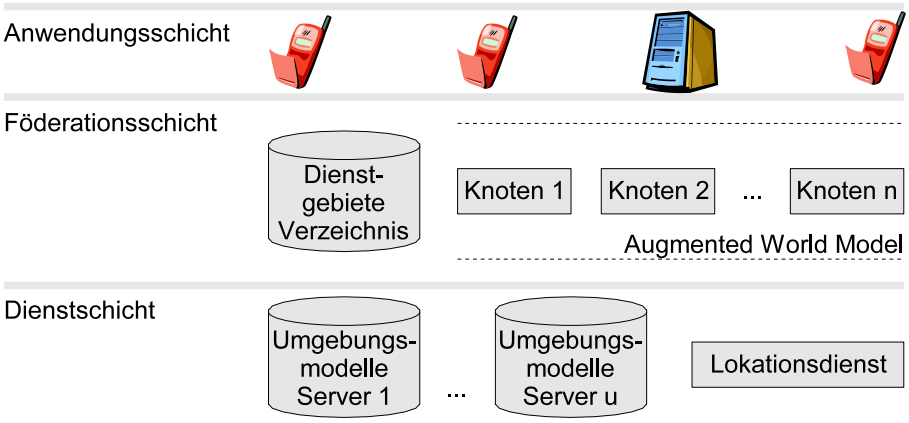


Abbildung 1.1: Die Architektur von Nexus nach [NGS+ 2001]

Lokationsdienst eine sehr große Zahl mobiler Objekte verwalten können. Um dieser Anforderung – Skalierbarkeit – gerecht zu werden, ist der Dienst verteilt und hierarchisch organisiert.

Das für diesen Lokationsdienst in [Leo 2003, Kapitel 6] vorgeschlagene Verfahren zur Positionsübermittlung ist geringfügig bedarfsangepasst. Jedes mobile Objekt bestimmt ständig die eigene Position und übermittelt sie entsprechend einem Koppelnavigationsprotokoll an den Lokationsdienst. Bei Bedarf kann der Lokationsdienst ein mobiles Objekt zu einer zusätzlichen Positionsübermittlung auffordern. Eine allgemeine Anpassung der Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen an den Informationsbedarf der Anfragen wird nicht vorgenommen. Der Lokationsdienst unterstützt energieschonendes Lokationsmanagement nur unzureichend.

1.4 Aufbau dieser Arbeit

In Kapitel 2 wird zunächst eine Einführung in Lokationsmanagement und existierende Arbeiten zu Energieverbrauch und Energieschonung gegeben. Anschließend wird das verwendete Systemmodell erläutert.

In Kapitel 3 wird die Problemstellung genau untersucht und vorhandene Ansätze zur Energieschonung bewertet. Nach Präsentation der prinzipiellen Lösungsidee zur Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen werden alle Fragen genannt, die für eine Umsetzung dieser Idee und zur Minimierung des Energieverbrauchs zu klären sind.

In Kapitel 4 wird diskutiert, wie die Anfrageschnittstelle zu erweitern ist, damit anfragende Anwendungen dem Lokationsdienst ihren Informationsbedarf möglichst genau spezifizieren können. Anschließend wird in Kapitel 5 untersucht, wie diese Informationen zur Minimierung des Energieverbrauchs bei der Verarbeitung von Positionsanfragen genutzt werden können. In Kapitel 6 wird die energieschonende Verarbeitung so genannter Gebietsanfragen und Gebietspositionsanfragen betrachtet.

In Kapitel 7 werden Ergebnisse aus umfangreichen Simulationen zur Minimierung des Energieverbrauchs bei Koppelnavigationsprotokollen und verwandten Protokollen und zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen präsentiert.

Der Hauptteil der Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8.

In Anhang A werden längere mathematische Analysen präsentiert, die im Rahmen dieser Arbeit entstanden sind. In Anhang B werden weitere Details zu den Simulationen genannt.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel wird der Aufbau typischer Lokationsmanagementsysteme in einer Übersicht dargestellt und anschließend die verschiedenen Aspekte im Einzelnen erläutert. Dazu gehören unter anderem technische Details zu Mobilkommunikation und Positionsbestimmung und algorithmische Details zur Verwaltung von Positionsdaten und zur Positionsübermittlung. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf existierenden Arbeiten zum Energieverbrauch und zur Energieschonung. In Abschnitt 2.9 wird das verwendete Systemmodell erläutert.

2.1 Lokationsmanagement

Das Lokationsmanagement hat die Aufgabe, Positionen mobiler Objekte zu bestimmen, die Positionsdaten zu erfassen und sie in geeigneter Form anderen Objekten zur Verfügung zu stellen.

Mit Lokationsmanagement in seiner Gesamtheit befassen sich einige Forschergruppen weltweit. Einige bekannte Projekte, neben Nexus, sind:

- *Ubiquitous Tracking:* Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung eines Frameworks für Augmented Reality-Anwendungen.

  Augmented Reality bezeichnet die Anreicherung oder Überlagerung der Realität mit virtuellen Elementen. Ein bekanntes Anwendungsgebiet ist die visuelle Anreicherung der Realität mit Hilfe einer speziellen Brille zur Bedienung komplizierter Maschinen. Der Benutzer sieht die Realität durch die Brille und erhält gleichzeitig graphisch Anweisungen zur Bedienung, die auf die Gläser oder direkt in sein Auge projiziert werden.

  Das Ubitrack Framework kann Positionsdaten von mehreren hundert oder tausend Sensoren erfassen, vereinen und den Anwendungen in geeigneter Form bereitstellen [UbiTrack].

- *Flame:* In diesem Projekt wird ein Framework zur Erstellung und Verwaltung ortsbezogener Anwendungen entwickelt. Von realen Positionsbestimmungstechniken wird durch geeignete Schnittstellen abstrahiert [Flame].

- *PoLoS:* So lautet die Abkürzung für „Platform for Location-Based Services“, eine Plattform für ortsbezogene Dienste von Mobilkommunikationsanbietern. Die Plattform unterstützt die Erstellung und Bereitstellung solcher Dienste und entsprechende Abrechnungsmodelle [PPM+ 2003].

- *Rover:* In diesem Projekt wird eine skalierbare Plattform für ortsbezogene Anwendungen entwickelt. Die Plattform vereinigt verschiedene Mobilkommunikationsstandards und Positionsbestimmungssysteme [Rover].

- *Place:* Die gleichnamige Plattform ist vergleichbar mit Rover. Sie unterstützt insbesondere kontinuierliche Anfragen [Place]. Letztere werden in Abschnitt 2.6 vorgestellt.

Ein Lokationsmanagementsystem kann in vier Schichten aufgeteilt werden. Diese sind in Abbildung 2.1 schematisch dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden diese Schichten und weitere Aspekte des Lokationsmanagements im Detail erläutert.

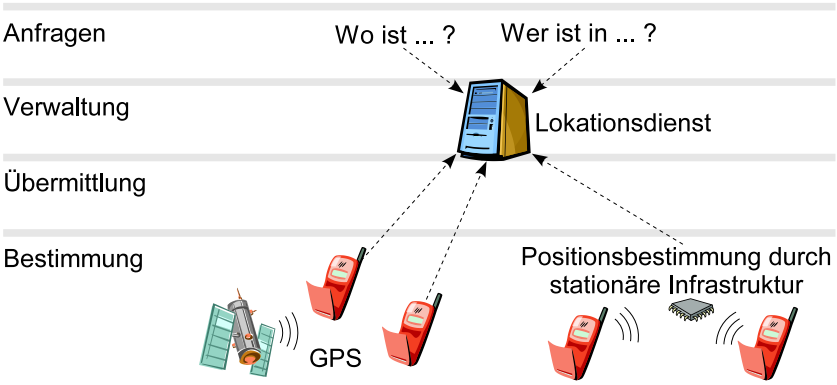


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau des Lokationsmanagements

2.2 Mobilkommunikation

Im Lokationsmanagement wird Mobilkommunikation für den Datenaustausch zwischen mobilen Objekten und dem Lokationsdienst benötigt.

In der Mobilkommunikation wird zwischen Ad-hoc-Netzen und Netzen im Infrastrukturmodus unterschieden. Letztere werden auch Infrastrukturnetze genannt.

In einem Ad-hoc-Netz nutzt jedes mobile Endgerät seine Mobilkommunikationsschnittstelle zur direkten Kommunikation mit anderen mobilen Endgeräten. Sind zwei mobile Endgeräte so weit voneinander entfernt, dass sie nicht direkt miteinander kommunizieren können, so müssen andere mobile Endgeräte dazwischen als Router fungieren und die Datenpakete weiterleiten.

Ein Infrastrukturnetz besteht aus mobilen Endgeräten und festinstallierten Basisstationen, teilweise auch Access Points genannt. Die Basisstationen können mit anderen festinstallierten Geräten oder Netzen verbunden sein. Die Basisstationen vermitteln Datenpakete zwischen mobilen Endgeräten, die miteinander kommunizieren möchten. Ebenso vermitteln sie Datenpakete zwischen mobilen Endgeräten und festinstallierten Geräten, die mit den Basisstationen verbunden sind. Jede Basisstation kann mit den mobilen Endgeräten innerhalb einer gewissen Reichweite kommunizieren und umgekehrt. Der Bereich, den eine Basisstation abdeckt, wird Funkzelle oder einfach Zelle genannt. In Zeichnungen werden Funkzellen oft wabenförmig dargestellt. In der Realität sind sie meist kreisförmig und überlappen sich. Die Basisstationen sind untereinander über kabelgebundene Netze, Richtfunkstrecken oder optische Freiraumübertragungsstrecken verbunden.

Da der Lokationsdienst normalerweise aus einem oder mehreren festinstallierten Rechnern besteht, werden in Lokationsmanagementsystemen Infrastrukturnetze zur Mobilkommunikation verwendet. Abbildung 2.2 zeigt eine mögliche Netzstruktur.

Unabhängig vom eigentlichen Positionsbestimmungssystem ist dem Mobilkommunikationssystem und damit auch dem Lokationsdienst die Position eines mobilen Objekts auf eine oder wenige Funkzellen genau bekannt.

Für die Mobilkommunikation existieren eine Reihe unterschiedlicher Systeme. Einige wichtige Standards zeigt Abbildung 2.3 nach [Sie 2004, Seite 11].

Für das Lokationsmanagement eignen sich viele Mobilkommunikationssysteme. Im Folgenden werden die wichtigsten Vertreter und besondere Eigenschaften genannt.

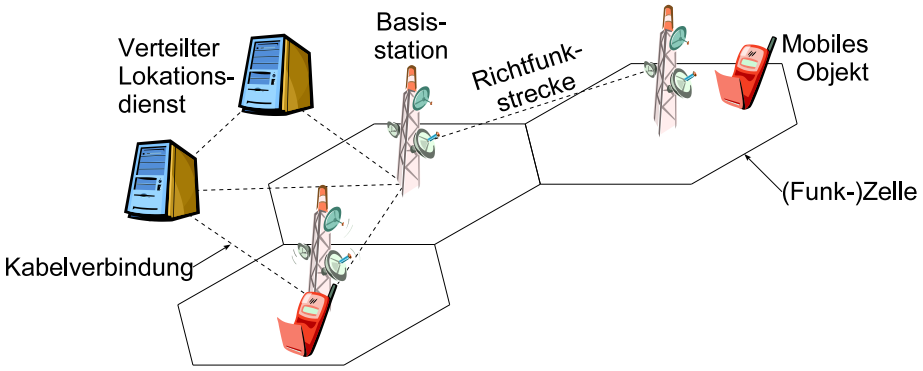


Abbildung 2.2: Infrastrukturnetz mit Lokationsdienst

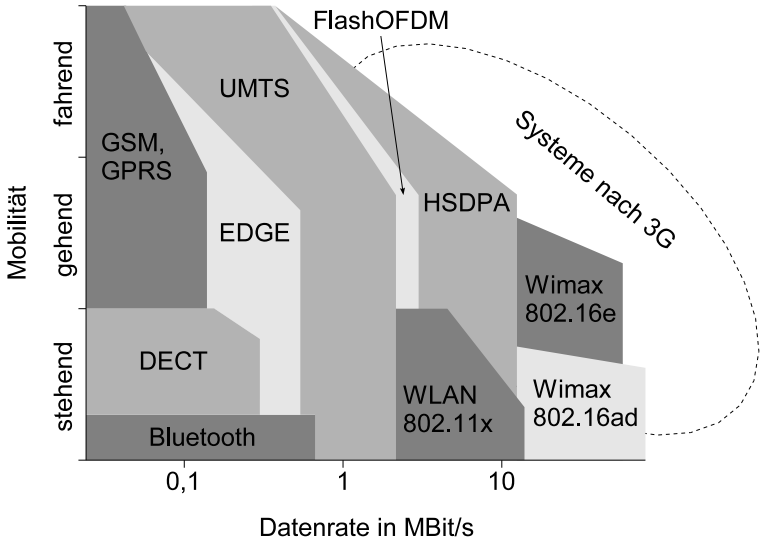


Abbildung 2.3: Wichtige drahtlose Kommunikationsstandards

Wireless LAN Der Begriff Wireless Local Area Network, kurz WLAN, wird normalerweise synonym für drahtlose Computernetze nach IEEE Standard 802.11 [IEEE 802.11] verwendet. Am häufigsten kommen die Erweiterungen 802.11b und 802.11g zum Einsatz [Wik 2005].

Die Datenübertragung erfolgt bei 802.11b und 802.11g auf Frequenzen zwischen 2,400 und 2,485 Gigahertz. Die maximale Übertragungsrate liegt bei elf beziehungsweise 54 Megabit pro Sekunde. Das genannte Frequenzband darf prinzipiell frei genutzt werden. Die Sendeleistungen der mobilen Endgeräte und der Basisstationen sind gesetzlich begrenzt und beschränken die Größe einer Funkzelle im Freien auf wenige hundert Meter. In Gebäuden ist die Reichweite oft deutlich unter hundert Metern.

Zum reibungslosen Wechsel zwischen Funkzellen, im Englischen Handover oder Handoff genannt, wurde die Erweiterung 802.11f entwickelt [Rau 2003]. Zuvor boten viele Hersteller dazu ein eigenes, proprietäres Protokoll. Inzwischen existieren sogar Verfahren für ein Handover zwischen WLANs und GSM-Netzen [Sch 2004, Seite 128].

Die Leistungsaufnahme einer WLAN-Schnittstelle nach der Erweiterung 802.11b ist mit

rund einem Watt [Ath 2003, KB 2002, SGHK 1996] relativ hoch. Dieser Wert gilt bereits für die reine Empfangsbereitschaft, wenn das mobile Endgerät weder sendet noch tatsächlich empfängt und nur nach dem Beginn einer Datenübertragung „horcht“. Grund für die hohe Leistungsaufnahme ist, dass in WLANs Inbandsignalisierung verwendet wird. Die mobilen Endgeräte werden über den normalen Datenübertragungskanal und nicht über einen separaten Signalisierungskanal über an sie gerichtete Datenpakete informiert. Dazu muss der Hochfrequenzverstärker der Schnittstelle ständig eingeschaltet sein.

Auf einem separaten Signalisierungskanal mit eigenem Hochfrequenzverstärker und geringer Übertragungsrate könnte energieeffizienter nach dem Beginn einer Datenübertragung gehorcht werden. Für den Empfang eines solchen Außerbandsignalisierungskanals benötigen die WLAN-Schnittstellen aber zusätzliche Hardware [SBS 2002].

Zur Leistungsaufnahme von WLAN-Schnittstellen existieren neben genauen Messungen auch präzise Modelle [FN 2001, ZDP 2004]. Das einfachste Modell verwendet zusätzlich zu einer konstanten Leistungsaufnahme die lineare Formel $W = m_i \cdot l + b_i$, wobei W der Energieverbrauch für ein Datenpaket und l die Länge des Datenpakets ist. m_i und b_i sind Parameter, die je nach Situation – Senden, Mithören oder Empfangen – zu wählen sind.

Die einzige Möglichkeit, den Energieverbrauch auf Ebene der Kommunikationsprotokolle deutlich zu reduzieren und trotzdem Nachrichten senden und empfangen zu können, besteht darin, den Hochfrequenzverstärker der WLAN-Schnittstelle kurzzeitig abzuschalten.

Der IEEE Standard 802.11 sieht einen entsprechenden Power-Save-Mode vor [IEEE 802.11, Abschnitt 11.2]. Die mobilen Endgeräte haben periodisch eine gemeinsame Wachphase, in der sie über an sie gerichtete Datenpakete informiert werden und das Senden eines Datenpakets anmelden können. In der Zeit nach der gemeinsamen Wachphase können alle mobilen Endgeräte, die kein Datenpaket senden möchten und an die keines gerichtet ist, die Hochfrequenzverstärker ihrer WLAN-Schnittstellen abschalten. Dieses Vorgehen wurde in einigen Arbeiten optimiert [VDL 2003, JV 2002, YHE 2002].

GSM und GPRS Das Global System for Mobile Communications, kurz GSM, gehört zur zweiten Generation der Mobilfunksysteme. Während die erste Generation analoge Systeme umfasste, arbeitet GSM vollständig digital. Mobile Endgeräte des GSM sind normalerweise Mobiltelefone, oft Handys genannt, aber auch GSM-Modems, zum Beispiel für Laptops, und einige PDAs.

GSM arbeitet in Europa im Wesentlichen mit Frequenzen um 900 und 1800 Megahertz und bietet für Telefonate eine Übertragungsrate von 9600 Bit pro Sekunde. Der General Packet Radio Service (GPRS) ermöglicht in GSM-Netzen auch paketorientierte Datenübertragung mit bis zu 171,2 Kilobit pro Sekunde [Sch 2004, Seite 35–38].

GSM unterscheidet zwischen Steuerkanälen und Datenkanälen. Für die meisten Kontrollfunktionen existiert ein separater Kanal [3GPP 2004, Kapitel 2]. Besonders wichtig ist der Paging Channel, über den eingehende Gespräche signalisiert werden. In Mobilfunksystemen wird das Signalisieren einer neuen Kommunikationsverbindung Paging genannt.

Anders als bei WLANs existieren zur Leistungsaufnahme von GSM-Schnittstellen nur wenige Messungen und Herstellerangaben. Da für die Kontrollfunktionen bei GSM separate Kanäle verwendet werden, braucht ein mobiles Endgerät zur Empfangsbereitschaft nur auf wenigen Kanälen zu horchen und hat dabei eine vielfach geringere Leistungsaufnahme als beim Senden oder Empfangen. Aktuelle Herstellerangaben [Rou 2004, SE 2005] nennen für GSM-Modems in der Empfangsbereitschaft durchschnittliche Leistungsaufnahmen zwischen 13 und 19 Milliwatt. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme während einer GSM-Verbindung beträgt

rund 950 Milliwatt. Bei GPRS-Verbindungen steigt die durchschnittliche Leistungsaufnahme auf 1300 Milliwatt. Die tatsächliche Leistungsaufnahme hängt stark von der Entfernung zur Basisstation ab.

Die Größe von Funkzellen variiert bei GSM sehr. Eine Funkzelle kann einen kleinen Stadtteil, aber auch ein Gebiet in der Größe eines Landkreises abdecken. Die Position eines mobilen Endgeräts ist auf eine oder einige wenige Funkzellen genau bekannt. Eine Gruppe benachbarter Funkzellen, in denen sich ein mobiles Endgerät frei bewegen kann, wird Location Area genannt. Wechselt ein mobiles Endgerät die Location Area, so muss es die Infrastruktur darüber informieren. In [PS 2001] werden mögliche Protokolle dazu und Datenbanken zur Verwaltung dieser Positionsdaten, so genannte Location Register, ausführlich vorgestellt.

Die Größe und Lage der Location Areas ist so gewählt, dass ein eingehendes Gespräch in nur wenigen Funkzellen signalisiert werden muss und die mobilen Endgeräte trotzdem möglichst selten die Location Area wechseln. Die Location Areas überlappen sich großzügig, damit ein mobiles Endgerät, das sich am Rand zweier Location Areas bewegt, nicht ständig den Wechsel der Location Area melden muss.

UMTS Das Universal Mobile Telecommunications System, kurz UMTS, gehört zur dritten Generation der Mobilfunksysteme. UMTS vereinigt verschiedene drahtlose Netze, wie Mobilfunk und schnurloses Telefonieren im Haus, und bietet verschiedene Dienste, zum Beispiel Videotelefonie und mobiles Internet. Zusätzlich bietet UMTS Dienstgütekriterien, wie Echtzeitfähigkeit. UMTS arbeitet auf zwei Frequenzbändern um 1950 und 2100 Megahertz und bietet Datenraten zwischen 144 Kilobit und zwei Megabit pro Sekunde [Sch 2004, Seite 83–96].

UMTS verwendet wie GSM separate Kanäle für Nutz- und Kontrolldaten [3GPP 2004b]. Mobile Endgeräte haben zur Empfangsbereitschaft eine relativ geringe Leistungsaufnahme.

2.3 Positionsbestimmung

Zur Positionsbestimmung existiert eine Reihe von Systemen. Sie basieren in der Regel auf ein oder zwei der folgenden vier Techniken [HB 2001]:

1. *Triangulation mit Laufzeiten:* Aus der Messung der Laufzeiten von Ultraschall- oder Funkwellen zwischen dem mobilen Objekt und einigen festen Punkten im Raum wird die Position des mobilen Objekts errechnet. Mathematisch wird dazu der Schnittpunkt mehrerer Kugelhüllen bestimmt.

2. *Triangulation mit Winkeln:* Mit Hilfe von Richtfunk wird der Winkel zu einem mobilen Objekt von festen Punkten aus bestimmt und daraus die Position des mobilen Objekts errechnet. Mathematisch handelt es sich um den Schnittpunkt mehrerer Halbgeraden oder Halbebenen.

3. *Nachbarschaft und Nähe:* Aus dem Empfang eines Infrarotsignals, der Messung der elektromagnetischen Feldstärke oder einer anderen Form der Kontaktierung, wird die Nähe eines mobilen Objekts zu einem oder mehreren bekannten Punkten im Raum festgestellt.

4. *Szenenanalyse:* Die Umgebung eines bestimmten Punkts wird an Hand bekannter Referenzdaten, wie Karten oder Bezugspunkten, analysiert und daraus die Position eines mobilen Objekts bestimmt.

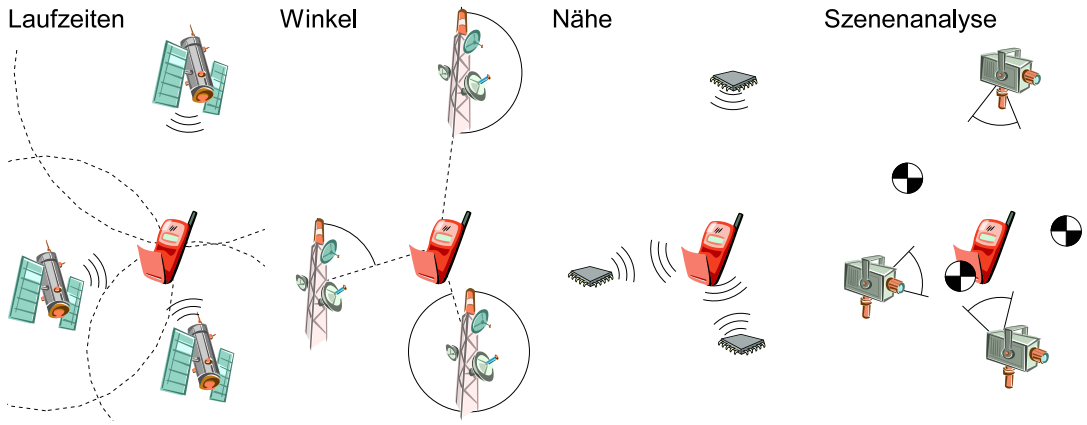


Abbildung 2.4: Vier Techniken zur Positionsbestimmung

Abbildung 2.4 zeigt eine graphische Darstellung der vier Techniken. Weitere Merkmale von Systemen zur Positionsbestimmung sind:

- *Abdeckung:* Einige Systeme sind für Gebäude oder einen einzelnen Raum bestimmt, andere Systeme eignen sich für die Positionsbestimmung in Städten, wieder andere für die Positionsbestimmung auf Kontinenten, Meeren oder dem gesamten Globus.

- *Darstellung der Position:* Die Darstellung der Position kann in geometrischen Angaben, wie Längen- und Breitengrad, oder symbolisch erfolgen. Typische symbolische Angaben sind Raumnummern und Adressen. Eine symbolische Positionsangabe ist intuitiver, erfordert aber aufwändige Lokationsmodelle [Dro 2003].

- *Genauigkeit:* Ein wichtiges Merkmal bei der Positionsbestimmung ist die erreichte Genauigkeit. Nach [KW 2005] lässt sich die Genauigkeit (accuracy) in zwei Merkmale gliedern: Präzision (precision) und Richtigkeit (trueness, accuracy of the mean).

  Die Präzision gibt an, wie weit unabhängig ermittelte Positionsdaten über dieselbe Position voneinander abweichen. Je geringer die Abweichung, desto höher ist die Präzision. Zur Abweichung von der tatsächlichen Position macht die Präzision keine Aussage – die ermittelten Positionen können alle weit von der tatsächlichen Position entfernt sein.

  Die Richtigkeit gibt an, wie weit der Mittelwert der ermittelten Positionen von der tatsächlichen Position entfernt ist. Je näher der Mittelwert an der tatsächlichen Position ist, desto höher ist die Richtigkeit.

  Eine hohe Genauigkeit ist genau dann gegeben, wenn das System hohe Präzision und hohe Richtigkeit bietet.

  Allgemein kann die Genauigkeit über Wahrscheinlichkeiten angegeben werden. Mit einer zweidimensionalen Dichtefunktion werden die tatsächlich möglichen Positionen eines mobilen Objekts in Abhängigkeit von der ermittelten Position beschrieben. Das Integral der Dichtefunktion über einem gewissen Gebiet gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der sich das mobile Objekt in diesem tatsächlich aufhält.

  Mögliche Dichtefunktionen zeigt Abbildung 2.5. Das kleine Kreuz in der Mitte jeder Dichtefunktion stellt die ermittelte Position dar. Eine sehr komplexe Dichtefunktion,

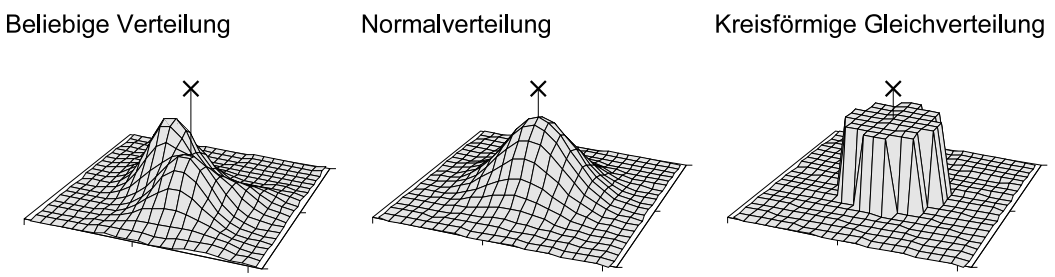


Abbildung 2.5: Zweidimensionale Dichtefunktionen zur Beschreibung der Genauigkeit

wie sie das linke Diagramm zeigt, kann zum Beispiel entstehen, wenn die Positionsbestimmung durch Gebäude oder das Terrain beeinflusst wird.

Häufig wird für die Genauigkeit Normalverteilung angenommen. Die zugehörige zweidimensionale Dichtefunktion zeigt das mittlere Diagramm. Bei vielen Positionsbestimmungssystemen trifft diese Dichtefunktion die tatsächliche recht genau.

Auch häufig, zum Beispiel in [Dud 2002, Seite 39] und [Leo 2003, Seite 40], wird eine kreisförmige Gleichverteilung angenommen, wie sie das rechte Diagramm zeigt. Die Genauigkeit lässt sich in diesem Fall über einen einzigen Parameter, den Kreisradius, beschreiben.

In vielen Anwendungen und Algorithmen wird eine maximale Abweichung g_B der tatsächlichen Position von der ermittelten verwendet. Bei kreisförmiger Gleichverteilung ist g_B der genannte Kreisradius. Bei Normalverteilung wird g_B so gewählt, dass die tatsächliche Position von der ermittelten nur in wenigen Prozent oder Promille der Positionsbestimmungen größer g_B ist. Mit diesem Vorgehen lässt sich für jedes Positionsbestimmungssystem eine Maximalabweichung g_B angeben.

- *Verzögerung:* Zur Positionsbestimmung müssen Messwerte von Sensoren und Empfängern in Positionsdaten umgerechnet werden. Die dafür benötigte Zeit wird meistens vernachlässigt. Ein mobiles Objekt kann sich währenddessen nur geringfügig von seiner letzten Position entfernen, verglichen mit der Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems.

  Bei sehr hohen Geschwindigkeiten, zum Beispiel in einem Flugzeug, ist die Dauer für Berechnung und Übertragung der Positionsdaten vom eigentlichen Empfänger-Chip zu einem Computer, der diese weiterverarbeitet, relevant. Für den GPS-Empfänger SkyNav GG12 werden in [Tha 2004] dafür 70 Millisekunden angegeben.

- *Verlustfreie und verlustbehaftete Positionsbestimmung:* Die Positionsbestimmung kann für das mobile Objekt verlustfrei, das heißt ohne Energieverbrauch, oder verlustbehaftet sein. Verlustfreie Systeme basieren häufig auf der Reflektion von Schall, Licht oder Funksignalen.

  Bei verlustfreier Positionsbestimmung können die mobilen Objekte nicht sicher identifiziert werden. Bei Smart Floor wird die Position eines Benutzers durch Drucksensoren unter den Fugenkreuzungen eines gefliesten Bodens bestimmt. Die Identifikation der Benutzer an Hand der unterschiedlichen Kräfte beim Auftreten ist selbst bei einer kleinen Gruppe von ungefähr zwanzig Personen nur in rund 90% der Fälle erfolgreich [Smart Floor].

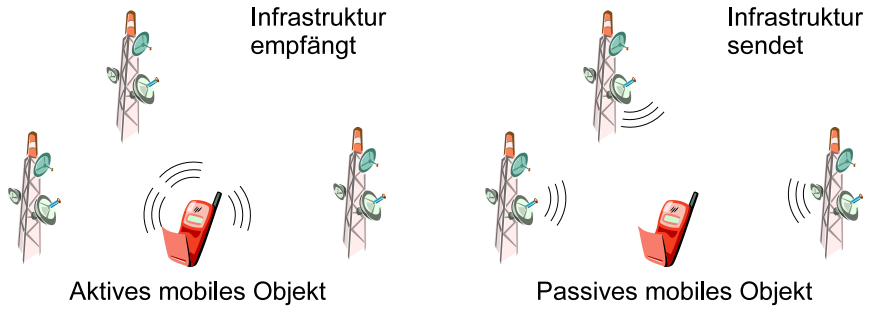


Abbildung 2.6: Aktive und passive mobile Objekte nach [SBGP 2004]

Für große Dienstgebiete und viele mobile Objekte sind existierende verlustfreie Positionsbestimmungssysteme völlig ungeeignet. Offen ist, ob dafür jemals geeignete verlustfreie Systeme entwickelt werden können.

- *Aktive und passive mobile Objekte:* In [SBGP 2004, Kapitel 1] wird bei verlustbehafteten Positionsbestimmungssystemen zwischen aktiven und passiven mobilen Objekten unterschieden. Abbildung 2.6 stellt beide Typen dar.

  Aktive mobile Objekte senden Signale aus, die an festen Bezugspunkten im Raum empfangen werden und aus denen die Position des mobilen Objekts bestimmt wird. Passive mobile Objekte empfangen Signale, die von bekannten Bezugspunkten im Raum aus gesendet werden, und bestimmen daraus selbst ihre momentane Position.

  Während aktive mobile Objekte periodisch nur *ein* Signal auszusenden brauchen, müssen passive mobile Objekte für eine Positionsbestimmung nach *mehreren* Signalen horchen. Kann ein passives mobiles Objekt die Signale nicht gleichzeitig empfangen, so ist die Positionsbestimmung weniger genau, da es sich zwischen dem Empfang zweier Signale weiterbewegen kann.

  Bei Systemen mit passiven mobilen Objekten ist die Zahl der Signale zur Positionsbestimmung unabhängig von der Zahl der mobilen Objekte. Die Systeme sind beliebig skalierbar.

  Ein weiterer Unterschied liegt darin, wie der Lokationsdienst über die Positionsdaten informiert wird. Ein passives mobiles Objekt bestimmt die Position lokal. Zunächst ist sie nur ihm bekannt. Es kann selbst entscheiden, ob und wann die Position dem Lokationsdienst übermittelt wird. Zur Positionsübermittlung verbraucht das mobile Objekt Energie zum Senden der entsprechenden Nachricht.

  Bei aktiven mobilen Objekten wird die Position von der stationären Infrastruktur bestimmt. Eine Positionsübermittlung, mit Mobilkommunikation und Energieverbrauch für die mobilen Objekte, ist nicht erforderlich. Der Lokationsdienst erhält die Positionsdaten sofort nach der Bestimmung vom Positionsbestimmungssystem. Möchte ein mobiles Objekt über die eigene Position informiert werden, so muss der Lokationsdienst die Positionsdaten explizit mit Mobilkommunikation an dieses übermitteln. Das mobile Objekt verbraucht Energie zum Empfang der Positionsdaten.

  Aktive mobile Objekte können ihre Position nicht bestimmen, ohne dass die Infrastruktur darüber informiert wird und die Positionsdaten erfährt – ein großer Nachteil

bezüglich der Privatsphäre gegenüber der Positionsbestimmung mit passiven mobilen Objekten.

Zum besseren Verständnis werden im Folgenden die wichtigsten Positionsbestimmungssysteme vorgestellt.

GPS Das Global Positioning System ist das wohl bekannteste System zur weltweiten Positionsbestimmung. Einst vor allem für die militärische Nutzung entwickelt, ist es inzwischen aus vielen Informationssystemen nicht mehr wegzudenken [GPS].

Für die Positionsbestimmung verwendet GPS Triangulation mit Laufzeiten. 30 Satelliten in zirka 20 000 Kilometer Höhe senden ein Datensignal mit je 50 Bit pro Sekunde aus, in dem sie unter anderem ihre lokale Zeit mitteilen, die sie mit Atomuhren bestimmen. Aus der Laufzeit der Signale dreier Satelliten kann die Position eines mobilen Objekts auf der Erdoberfläche im Rahmen der Genauigkeit eindeutig bestimmt werden. Existierende GPS-Empfänger benötigen zur Korrektur des lokalen Uhrendrifts während der Laufzeitmessung das Signal eines vierten Satelliten [ZWS+ 2004, Abschnitt 8.2].

Moderne GPS-Empfänger [Amb 2004, Atm 2003, Fal 2005, For 2004, Mic 2004, Rik 2005] erreichen eine Genauigkeit zwischen 25 und zehn Metern bei 95% der Positionsbestimmungen. Bei Differential-GPS (DGPS) wird die Genauigkeit mit Korrekturdaten stationärer Empfänger verbessert [Sch 2004, Seite 211]. Das Wide Area Augmention System (WAAS) und der European Geostationary Navigation Overlay Service (EGNOS) sind Zusatznavigationsdienste, welche nach dem Prinzip von DGPS Korrekturdaten von geostationären Satelliten aus senden. In Europa, Nordamerika und anderen Teilen der Erde wird mit ihnen bei 95% der Positionsbestimmungen eine Genauigkeit von drei Metern erreicht. Die Signale der GPS-Satelliten können in Gebäuden und tiefen Häuserschluchten oft gar nicht oder nur mit hochempfindlicher Technik empfangen werden.

Am meisten Energie verbraucht der Hochfrequenzverstärker eines GPS-Empfängers. Er verstärkt die Satellitensignale, so dass sie ausgelesen werden können. Dank eines Codemultiplexverfahrens können die Satellitensignale gleichzeitig empfangen werden. Der Energieverbrauch für die weitere Verarbeitung der Signal- und Messdaten bis zur abschließenden Berechnung der Position kann vernachlässigt werden. Bei eingeschaltetem Hochfrequenzverstärker haben gängige GPS-Empfänger eine Leistungsaufnahme zwischen 0,1 und 0,3 Watt.

Die Einschaltdauer des Hochfrequenzverstärkers für eine einzelne Positionsbestimmung, und damit Dauer und Energieverbrauch, hängen wesentlich davon ab, wie lang die letzte Positionsbestimmung zurückliegt. Je kürzer sie zurückliegt, desto mehr Daten können wiederverwendet werden und desto kürzer ist die benötigte Einschaltdauer des Hochfrequenzverstärkers. Mögliche Daten sind:

- *Almanachdaten:* In den Almanachdaten werden die Umlaufbahnen der Satelliten grob beschrieben. Ferner enthalten sie Uhrenkorrekturfaktoren und Informationen über Signalverzögerungen durch die Atmosphäre. Zum Empfang aller Almanachdaten müssen die Satellitensignale 12,5 Minuten lang ausgelesen werden.

- *Ephemeridendaten:* Die Ephemeridendaten enthalten präzise Informationen über die Umlaufbahnen der Satelliten. Aus ihnen kann die Position eines Satelliten zu einem bestimmten Zeitpunkt berechnet werden. Zum Empfang aller relevanten Ephemeridendaten für eine Positionsbestimmung benötigt ein GPS-Empfänger, dem aktuelle Almanachdaten vorliegen, rund 30 Sekunden.

- *Signalverschiebung:* Jedem Satellit ist ein eigener binärer Code zugeordnet, den er einmal pro Millisekunde aussendet. Zur Laufzeitmessung ermittelt der GPS-Empfänger den Zeitpunkt, zu dem er den Beginn des Codes empfängt, auf etwa zehn Mikrosekunden genau. Dazu wird lokal ein Referenzsignal erzeugt und zeitlich so lange verschoben, bis sich die Codes in Referenzsignal und empfangenem Satellitensignal decken. Kann die Signalverschiebung für eine neuerliche Positionsbestimmung nicht aus der Signalverschiebung der letzten Positionsbestimmung abgeschätzt werden, so dauert eine Positionsbestimmung etwa zwei Sekunden. Die Zeit kann durch parallele Suche nach der richtigen Signalverschiebung reduziert werden.

Entsprechend dieser Daten werden vier „Starts“ unterschieden:

1. *Kaltstart (Cold start):* Die letzte Positionsbestimmung liegt viele Stunden zurück. Almanach- und Ephemeridendaten sind veraltet. Für die Suche nach der Signalverschiebung liegt kein sinnvoller Ausgangswert vor.

   Moderne GPS-Empfänger können selbstständig nach Satelliten suchen und sind nicht vollständig auf die Almanachdaten angewiesen. Eine Positionsbestimmung im Kaltstart dauert bei ihnen zwischen 40 und 90 Sekunden.

2. *Warmstart (Warm start):* Der Empfänger war mehr als zwei Stunden abgeschaltet oder wurde abgeschaltet mehrere hundert Kilometer weit bewegt. Die Almanachdaten sind noch aktuell, nicht aber die Ephemeridendaten. Für die Suche nach der Signalverschiebung liegt kein sinnvoller Ausgangswert vor.

   Die Positionsbestimmung dauert etwa 30 Sekunden.

3. *Heißstart (Hotstart):* Der Empfänger war für 0,5 bis 120 Minuten abgeschaltet. Almanach- und Ephemeridendaten sind aktuell. Für die Suche nach der Signalverschiebung liegt kein sinnvoller Ausgangswert vor.

   Die Positionsbestimmung dauert etwa zwei Sekunden. Je länger die letzte Positionsbestimmung zurück liegt, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die Ephemeridendaten veraltet sind und die Positionsbestimmung als Warmstart erfolgen muss.

4. *Wiederaufnahme (Reacquisition):* Die letzte Positionsbestimmung liegt weniger als 30 Sekunden zurück. Almanach- und Ephemeridendaten sind aktuell. Für die Suche nach der Signalverschiebung liegt ein sinnvoller Ausgangswert vor.

   Je nachdem, wie lange die Satellitensignale nicht empfangen wurden, dauert die Suche nach der richtigen Signalverschiebung zwischen 200 und 500 Millisekunden. Diese Zeit hängt auch von der gewünschten Genauigkeit ab.

Alle genannten Zeiten sind stark geräteabhängig [Atm 2003, KW 2005, Mic 2004, Mot 2003, Rik 2005, Ubl 2005]. Außerdem hängen sie von der gewünschten Genauigkeit und der Zahl der sichtbaren Satelliten ab. Ein Satellit ist sichtbar, wenn sein Signal empfangen werden kann. Das gilt normalerweise für alle Satelliten, die sich, von der momentanen Position aus gesehen, oberhalb des Horizonts befinden.

Für die Energieschonung ist wichtig, dass die Dauer einer Positionsbestimmung und damit der Energieverbrauch beim Heißstart zehnmal höher sein kann als bei Wiederaufnahme. Abhängig vom Gerät kann es sinnvoller sein, Positionsbestimmungen häufiger vorzunehmen [Fal 2005, Seite 23].

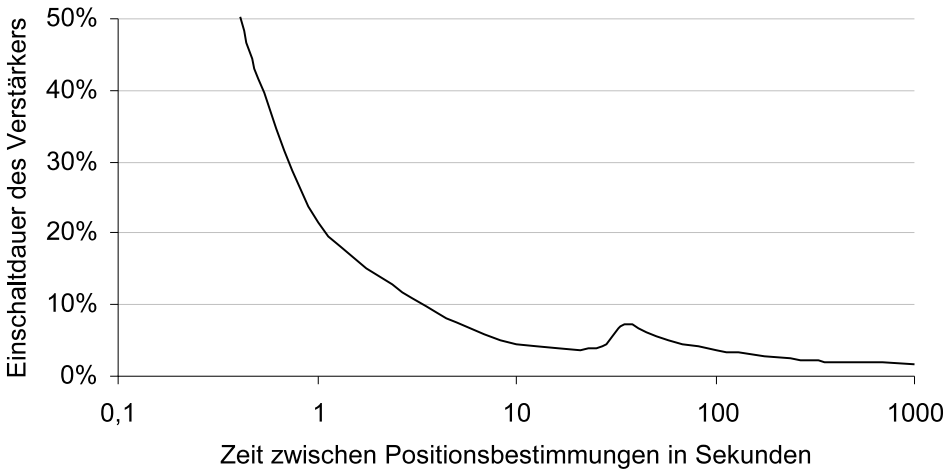


Abbildung 2.7: Einschaltdauer des Hochfrequenzverstärkers eines GPS-Empfängers

Abbildung 2.7 zeigt die typische durchschnittliche Einschaltdauer des Hochfrequenzverstärkers in Abhängigkeit von der Zeitspanne zwischen zwei Positionsbestimmungen. Im Diagramm ist berücksichtigt, dass der Hochfrequenzverstärker zum Empfang neuer Ephemeridendaten dreimal pro Stunde 18 Sekunden lang eingeschaltet wird. Der Empfang der Ephemeridendaten dauert nur 18 Sekunden, wenn dem GPS-Empfänger aus kurz zuvor erfolgten Positionsbestimmungen bekannt ist, wann die Ephemeridendaten von den Satelliten übertragen werden [KW 2005].

Die Hersteller von GPS-Empfängern haben eine Reihe verschiedener Betriebsmodi entwickelt:

- *Kontinuierlicher Modus (Continuous Mode):* Der Hochfrequenzverstärker ist ständig eingeschaltet. Positionsbestimmungen erfolgen mit einer Rate zwischen einem und fünf Hertz. Nach einer Signalunterbrechung, zum Beispiel wegen einer Tunnelfahrt, kann die Positionsbestimmung binnen 100 bis 500 Millisekunden wieder aufgenommen werden wenn die Blockierung höchstens 30 Sekunden gedauert hat.

  Moderne GPS-Empfänger haben in diesem Modus eine Leistungsaufnahme von 0,1 bis 0,3 Watt.

- *Trickle Power Mode:* Der Verstärker wird alle ein bis zehn Sekunden für 200 bis 500 Millisekunden eingeschaltet und die Position bestimmt [Ubl 2000, Seite 5]. Zwei- bis viermal in der Stunde wird der Verstärker 18 Sekunden lang zum Empfang neuer Ephemeridendaten eingeschaltet.

  Je nach Rate kann die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Vergleich zum kontinuierlichen Modus um 80 bis 95% reduziert werden.

- *Push to Fix Mode:* Wie im Trickle Mode werden mehrmals in der Stunde neue Ephemeridendaten selbstständig empfangen. Ansonsten erfolgt eine Positionsbestimmung nur bei expliziter Aufforderung. Sie erfolgt normalerweise im Heißstart und dauert rund zwei Sekunden [Ubl 2000, Seite 7].

Es existieren weitere Modi: Snap Start [For 2004] – ein rascher Heißstart – und FixNOW [Ubl 2002].

Mit Assisted GPS (A-GPS) kann die Zeit für einen Kalt- oder Warmstart – und damit auch der Energieverbrauch – von GPS-Empfängern in Mobiltelefonen oder PDAs stark reduziert werden, indem der Mobilfunkanbieter die Almanach- und Ephemeridendaten mitteilt [Ubl 2004].

Galileo Das europäische Positionsbestimmungssystem Galileo ist vollständig kompatibel zum GPS und basiert auf dem gleichen Prinzip, bietet aber eine höhere Genauigkeit – rund zwei Meter [Galileo]. Die Satellitensignale sind bei Galileo so stark, dass sie auch in Gebäuden und Tunneln empfangen werden können. Im Jahr 2008 soll das System fertig gestellt werden.

Voll ausgebaut stehen den Anwendern mit Galileo und GPS sechzig Satelliten zur Positionsbestimmung zur Verfügung. Für das Jahr 2010 prognostiziert die Generaldirektion Energie und Verkehr der Europäischen Kommission weltweit drei Milliarden Empfänger [Gal 2004].

Active Badges und Bats Active Badges sind kleine elektronische Geräte, welche periodisch ein Infrarotsignal mit einer Kennung aussenden. Stationäre Sensoren in jedem Raum eines Gebäudes empfangen dieses Signal und können daraus eine symbolische Positionsangabe bestimmen, die beschreibt, wo sich der Träger dieses Badges aufhält. Das von AT&T entwickelte System wurde an einige Universitäten ausgeliefert und hat dort seine Alltagstauglichkeit bewiesen [Active Badge].

Das Nachfolgersystem Bat verwendet Ultraschall statt Infrarot [Bat]. Gleichzeitig mit einem Ultraschallsignal sendet ein Bat auch ein Funksignal. Über Mikrofone an der Zimmerdecke kann die Laufzeit des Ultraschallsignals gemessen werden und die Position innerhalb eines Raums auf knapp zehn Zentimeter genau bestimmt werden.

Das Active Badge System und das Bat System benötigen eine aufwändige Infrastruktur und sind wegen der aktiven mobilen Objekte in der Skalierbarkeit beschränkt.

Cricket Das Cricket-System basiert auf den Ideen von Bat [HB 2001]. Es verwendet ebenfalls Ultraschallsignale und bietet eine Genauigkeit im Zentimeterbereich [Cricket].

Zur Verbesserung der Skalierbarkeit wurde ein hybrider Ansatz entwickelt. In der Regel senden stationäre Lautsprecher der Infrastruktur Ultraschallimpulse zusammen mit einem Funksignal aus, die die mobilen Objekte zur Bestimmung ihrer Position verwenden. Damit sich die Ultraschallimpulse der verschiedenen Lautsprecher nicht überlagern, werden diese abwechselnd erzeugt. Bewegt sich ein mobiles Objekt zwischen aufeinanderfolgenden Ultraschallimpulsen sehr unregelmäßig, so kann es aus den gemessenen Laufzeiten seine Position nicht eindeutig bestimmen. Ist dies der Fall, so sendet das betroffene mobile Objekt selber einen Ultraschallimpuls aus, mit dem die Position – wie im Bat System – sofort von der Infrastruktur bestimmt werden kann [SBGP 2004].

MPS Allgemein ist die Position eines mobilen Endgeräts in GSM-Netzen nur auf die Location Area genau bekannt, wie in Abschnitt 2.2 erläutert. Mit dem Mobile Positioning System (MPS) kann die Position eines mobilen Endgeräts auf 150 bis 50 Meter genau ermittelt werden, indem sie von vier oder mehr benachbarten Basisstationen mit Triangulation bestimmt wird [ZWS+ 2004, Abschnitt 8.4].

Microsofts RADAR Zur Positionsbestimmung mit WLANs existieren einige Systeme. Vertreter sind zum Beispiel RADAR, die Ekahau Positioning Engine [Ekahau] und Place Lab.

Bei RADAR [BP 2000] senden die mobilen Objekte regelmäßig Nachrichten an alle benachbarten Access Points. Die Access Points messen die Signalstärke, mit denen die Nachrichten eintreffen, und berechnen daraus die Position des mobilen Objekts. Zwei Vorgehensweisen werden in [BP 2000, Kapitel 4] genauer untersucht:

1. *Empirische Methode:* Dabei werden vorab für jede Position die Signalstärken an den Access Points ermittelt und in Form von Signalstärkekarten gespeichert. Für die Positionsbestimmung wird anschließend auf diese Daten zurückgegriffen. RADAR erreicht so bei 50% der Positionsbestimmungen eine Genauigkeit von drei Metern.

2. *Funkwellenausbreitungsmodell:* Aus vorab gemessenen Signalstärken wird ein allgemeines Modell für die Signalstärke in Abhängigkeit des Abstands vom Access Point und dazwischen liegenden Hindernissen, wie Wänden, entwickelt. Zur Positionsbestimmung wird anschließend dieses Modell zusammen mit einem Gebäudeplan verwendet. RADAR erreicht so bei 50% der Positionsbestimmungen eine Genauigkeit von 4,3 Metern.

Die vermeintlich höhere Genauigkeit der empirischen Methode ist trügerisch. Bereits Änderungen der Raumausstattung können die empirisch ermittelten Daten obsolet machen [HB 2001]. In [PMP 2003, Seite 84] wird vorgeschlagen, die Aktualisierung der Signalstärkenkarten zu automatisieren.

Place Lab Bei Place Lab [LMCC+ 2005] erfolgt die Positionsbestimmung in WLANs bei den mobilen Objekten. Vorteil ist, dass jeder Access Point zur Positionsbestimmung verwendet werden kann. Eine explizite Kooperation der Access Points, wie bei RADAR, ist nicht erforderlich.

Nach dem IEEE Standard 802.11 [IEEE 802.11] hat jeder Access Point eine individuelle Kennung, die er in jedem Datenpaket mitsendet. Die mobilen Objekte verfügen über eine Datenbank, in der die Kennungen und die Positionen der zugehörigen Access Points gespeichert sind. Detaillierte Informationen wie Signalstärkekarten oder Gebäudepläne werden nicht verwendet.

Zur Positionsbestimmung horcht ein mobiles Objekt nach Datenpaketen nahe gelegener Access Points. Empfängt es ein Datenpaket, so liest es die Kennung aus und ermittelt mit Hilfe der Datenbank die Position des zugehörigen Access Points. Aus den Positionsdaten mehrerer umliegender Access Points berechnet das mobile Objekt anschließend die eigene Position. Sind weitere Informationen über die Access Points bekannt, wie Antennentyp oder Sendeleistung, so werden diese mit einberechnet.

In Großstädten liegen Access Points so dicht, dass mit Place Lab oft eine Genauigkeit von 20 Metern erreicht wird. Je ländlicher die Gegend, desto geringer ist normalerweise die Genauigkeit und desto größer die Wahrscheinlichkeit, dass eine Positionsbestimmung gar nicht möglich ist.

Place Lab kann auch mit GSM Basisstationen und Bluetooth verwendet werden. Mit GSM beträgt die Genauigkeit nur 100 bis 200 Meter, dafür funktioniert die Positionsbestimmung in der Regel auch in Vororten und ländlichen Gebieten.

Datenbanken, die die Kennungen und die Positionen der zugehörigen Access Points enthalten, sind im Internet oft frei verfügbar. Sie können mit War-Driving automatisch erstellt werden. Dazu werden, neben einem Fortbewegungsmittel, ein Computer mit entsprechender Funknetzschnittstelle und ein GPS-Empfänger benötigt.

TV-GPS Auf der Idee, vorhandene Funksender – ohne spezielle Kooperation oder Modifikation – zur Positionsbestimmung zu verwenden, basiert auch TV-GPS [RS 2005].

Ist eine Positionsbestimmung mit GPS nicht möglich, so verwendet der TV-GPS-Empfänger die Signale des digitalen Fernsehens zur Positionsbestimmung. Diese Signale enthalten Synchronisationscodes, die sogar Laufzeitmessungen erlauben. Bei TV-GPS erfolgt die Positionsbestimmung nicht autark bei den mobilen Objekten, sondern mit zusätzlichen Daten festinstallierter Messstationen auf einem zentralen Rechner.

2.4 Mobile Objekte

Mobile Objekte sind Personen oder bewegliche Gegenstände, die am Lokationsmanagement teilnehmen. Innerhalb des Lokationsmanagements ist jedem mobilen Objekt ein eineindeutiger Bezeichner zugeordnet. In [GL 2004, Abschnitt 2.2] werden die Bezeichner Objekt-IDs und in [Wol 2002] Schlüssel (Keys) genannt. In [BDST 2001, Kapitel 4] werden virtuelle und physikalische Tags unterschieden. Virtuelle Tags werden stationären Objekten zugeordnet. Da diese sich nicht bewegen können, braucht es keine physikalisch existierende Markierung oder Technik, um die Position bestimmen zu können. Die Position eines physikalischen Tags kann bestimmt werden. Sie werden mobilen Objekten zugeordnet und auch real an ihnen angebracht.

Allgemein muss die Position eines mobilen Objekts entweder von einer statischen Infrastruktur oder durch das mobile Objekt selbst bestimmt werden können. Zum Übermitteln der Positionsdaten an den Lokationsdienst müssen mobile Objekte, die ihre Position selbst bestimmen, über eine geeignete Mobilkommunikationsschnittstelle verfügen.

Oft repräsentieren die Bezeichner im Lokationsmanagement nicht direkt die Objekte, deren Position bestimmt wird. Bei Personen beispielsweise wird in der Regel die Position eines Geräts bestimmt, das diese Person normalerweise mit sich trägt. Der Lokationsdienst muss in solchen Fällen Gerätekennungen und Bezeichner für mobile Objekte gemeinsam verwalten und entsprechend zuordnen. Vergleichbares geschieht bei GSM mit der International Mobile Subscriber Identity, kurz IMSI, die auf die Mobile Subscriber ISDN Number – die Telefonnummer – und auf den Namen des Besitzers abgebildet wird.

Die Abbildung des eigentlichen technischen Geräts, dessen Position bestimmt wird, auf einen Benutzernamen oder den Bezeichner eines größeren, beweglichen Gegenstands, kann statisch oder dynamisch sein. Während Mobiltelefone oft über Jahre dem selben Besitzer zugeordnet sind, kann der Benutzer eines Laptops häufig wechseln. Der Name des aktuellen Benutzers kann in diesem Fall über den Loginnamen ermittelt werden.

2.5 Lokationsdienst

Der Lokationsdienst steht im Mittelpunkt eines Lokationsmanagementsystems. Seine zentralen Aufgaben sind das Entgegennehmen und Verwalten der Positionsdaten aller Objekte in seinem Dienstgebiet und die Bearbeitung von Anfragen beliebiger Anwendungen. An den Lokationsdienst werden eine Reihe von Anforderungen gestellt, die im Folgenden einzeln diskutiert werden.

Schnittstellen und Abstraktion Die Anwendungen benötigen eine Schnittstelle, über die sie Positionsdaten vom Lokationsdienst erfragen können. Vielfach werden einfache Abfrageschnittstellen verwendet, entsprechend der in Abschnitt 2.6 vorgestellten Anfragetypen.

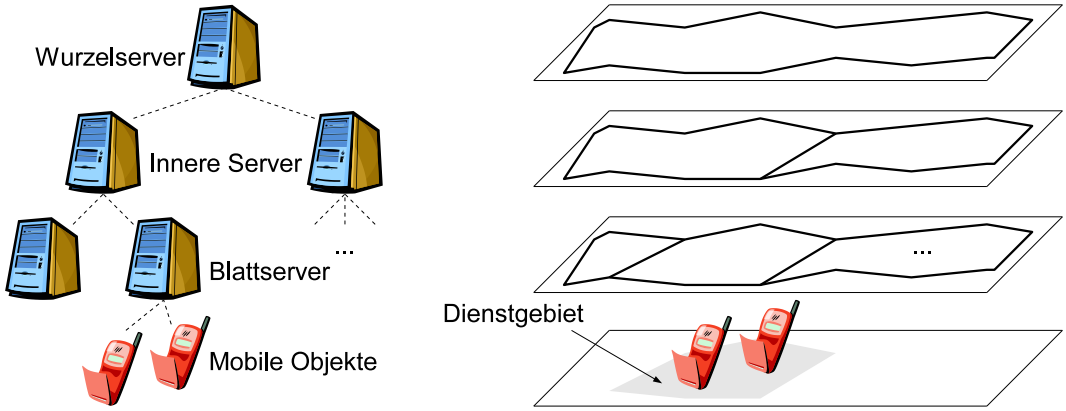


Abbildung 2.8: Verteilter, skalierbarer Lokationsdienst nach [Leo 2003]

In der Forschung werden aber auch datenbankähnliche Anfragesprachen diskutiert, die die Formulierung sehr komplexer Anfragen ermöglichen sollen [GBE+ 2000, SWCD 1997].

Anwendungen sollen möglichst unabhängig von den Positionsbestimmungsverfahren arbeiten. Dazu muss der Lokationsdienst technologieabhängige Eigenschaften der Positionsbestimmung verstecken. Der Lokationsdienst bildet eine Abstraktionsschicht zwischen den Anwendungen und der Positionsbestimmung. Die Schnittstelle zur Positionsbestimmung muss offen für neue Verfahren sein, da universelle Positionsbestimmung wohl auch zukünftig nur durch Kombination mehrerer Verfahren erfolgen wird [PMP 2003].

Dynamik und Skalierbarkeit Während bei typischen Datenbanken die Zahl der Änderungen gegenüber der Zahl der Anfragen gering ist, müssen Lokationsdienste sehr viele Änderungen verarbeiten. Traditionelle Datenbanksysteme sind hierfür ungeeignet [Leo 2003, Abschnitt 7.2]. Die Forschung bemüht sich um die Entwicklung spezieller Datenbanksysteme, die für die Verwaltung hochdynamischer, räumlicher Daten geeignet sind [PXK+ 2002, XMA+ 2004, Wol 2002].

Eine besondere Herausforderung sind Daten, deren Werte abhängig von der Zeit sind. Ein Beispiel dafür ist das Vorhersagen der Position eines mobilen Objekts im Rahmen eines Koppelnavigationsprotokolls. Geeignete Speicher- und Indexstrukturen sind noch Gegenstand der Forschung. Dazu gehören unter anderem Velocity Constrained Indexing [PXK+ 2002] und das Mobile Objects Spatial-Temporal Datenmodell [SWCD 1997].

Ein universeller Lokationsdienst muss Millionen Positionsdaten und Anfragen verarbeiten können [BDST 2001]. Dafür geeignete Konzepte wie Replikation, Partitionierung und hierarchische Strukturierung werden in [Leo 2003] und [LR 2002] ausführlich besprochen. Abbildung 2.8 stellt eine mögliche Hierarchie innerhalb eines Lokationsdienstes dar. Für die meisten Anwendungen kann der Lokationsdienst aber als verteilungstransparent angenommen werden.

Schutz der Privatsphäre Positionsdaten sind sehr sensible Daten, besonders wenn sie den Aufenthaltsort von Menschen beschreiben [PMP 2003]. In der Regel wird angenommen, dass die Benutzer dem Lokationsdienst vertrauen und ihm ihre Positionsdaten ohne Einschränkungen übermitteln. Nur unter dieser Annahme ist die zentrale und effiziente Positionsdatenverwaltung durch den Lokationsdienst möglich. Zwei wichtige Maßnahmen zum Schutz der

Privatsphäre basieren auf Zugriffsrechten, die in Zugriffkontrolllisten definiert werden können [Leo 2003, Kapitel 8]:

1. *Erlaubte Anfragen:* Jedes mobile Objekt legt individuell fest, welche anderen Objekte oder Gruppen es in Anfragen einbeziehen dürfen. Der Lokationsdienst verwirft alle Anfragen von Objekten oder Benutzern, die über ein mobiles Objekt gestellt wurden, das den Zugriff nicht gestattet hat.

2. *Reduzierte Genauigkeit:* Vor dem Senden einer Antwort verschleiert der Lokationsdienst die enthaltenen Positionsdaten entsprechend den individuell eingestellten Zugriffsrechten der angefragten Objekte. Das Verschleiern kann durch Addition kryptographisch sicherer Zufallszahlen zu den Positionsdaten oder durch Rundung geschehen.

   Problematisch sind Anfragen, die durch Angabe von Enthaltensein oder Nächster-Nachbar-Beziehungen beantwortet werden. Antworten auf solche Anfragen können nicht verschleiert, sondern nur verfälscht werden – ein in vielen Anwendungen inakzeptables Vorgehen.

2.6 Anfragen und Ereignisse

Die Anfrageverarbeitung ist ein wichtiges und viel diskutiertes Thema im Lokationsmanagement. Existierende Systeme, wie sie zum Beispiel von Mobilfunkanbietern verwendet werden, unterstützen oft nur Positionsanfragen, das heißt die Suche nach dem Aufenthaltsort eines bestimmten mobilen Endgeräts. Anwendungsfälle zeigen, dass ein universelles Lokationsmanagementsystem eine Reihe weiterer Anfragetypen und auch so genannte Ereignistypen unterstützen sollte [Leo 2003, Abschnitte 4.3 und 4.4].

Anfragetypen Die wichtigsten Anfragetypen sind:

- *Positionsanfrage:* „Wo befindet sich das Objekt ...?“

  Mit einer Positionsanfrage kann die Position eines einzelnen Objekts ermittelt werden. Die Antwort enthält aktuelle Positionsdaten des angefragten mobilen Objekts.

- *Gebietsanfrage:* „Welche Objekte befinden sich in ...?“

  Mit einer Gebietsanfrage können alle Objekte innerhalb eines fest umrissenen Gebiets – zum Beispiel durch Angabe eines geschlossenen Kanten- oder Kurvenzugs – ermittelt werden. In Forschungsarbeiten werden die angefragten Gebiete oft als Rechtecke parallel zu den Koordinatenachsen dargestellt [CHC 2004, Mok 2004, PXK+ 2002] – in der Realität müssen komplexere Formen verarbeitet werden. Die Antwort enthält die Objekt-IDs aller mobilen Objekte, die sich innerhalb des angefragten Gebiets aufhalten.

  Bei einer *Gebietspositionsanfrage* enthält die Antwort zusätzlich die aktuellen Positionsdaten aller mobilen Objekte, die sich in dem angefragten Gebiet aufhalten.

- *Nachbarschaftsanfrage:* „Welches Objekt ist ... am nächsten??“

  Mit einer Nachbarschaftsanfrage wird das nächste Objekt zu einem Bezugspunkt oder einem Bezugsgebiet bestimmt. Es kann auch der k-nächste Nachbar ermittelt werden [Mok 2004, Abschnitt 3.2]. Die Antwort enthält die Objekt-ID des mobilen Objekts, das die Bedingung erfüllt.

Optional kann die Antwort die Positionsdaten des entsprechenden mobilen Objekts enthalten. Dieser Anfragetyp wird fortan *Nachbarschaftspositionsanfrage* genannt.

Mit einer Gebiets-, Gebietspositions-, Nachbarschafts- oder Nachbarschaftspositionsanfrage müssen nicht alle mobilen Objekte angefragt werden. Die Anfrage kann auf eine beliebige Menge mobiler Objekte beschränkt werden.

Zeitlicher Bezug Daten im Lokationsmanagement unterscheiden sich von denen traditioneller Datenbanken durch ihren räumlichen und zeitlichen Bezug. Bezüglich der Zeit gibt es nach [MAHP 2003] Anfragen über die:

1. *Vergangenheit (Historical Queries):* Die Antwort wird an Hand von archivierten Positionsdaten ermittelt.

2. *Gegenwart (Now Queries):* Die Antwort wird aus aktuellen Positionsdaten ermittelt.

3. *Zukunft (Future Queries):* Die Antwort wird aus aktuellen und älteren Positionsdaten vorhergesagt.

Da der Schwerpunkt dieser Arbeit weder auf dem Archivieren von Positionsdaten noch dem Vorhersagen liegt, werden ausschließlich Anfragen über die Gegenwart betrachtet.

Zeitliche Auswertung Die eben genannte Klassifikation steht orthogonal zu einer weiteren, die die zeitliche Auswertung der Anfragen beschreibt [SWCD 1997]:

1. *Diskrete Anfrage (Discrete, instantaneous oder snapshot Query):* Die Anfrage wird an Hand der momentan vorliegenden Daten ein Mal ausgewertet.

2. *Persistente Anfrage (Persistent Query):* Die Anfrage betrifft einen festen, absoluten Zeitpunkt. Reichen die dem Lokationsdienst vorliegenden Daten für eine sichere Beantwortung der Anfrage nicht aus – normalerweise handelt es sich um eine Anfrage bezüglich der Zukunft – so wird zunächst die vermutete Antwort mitgeteilt. Diese wird ständig überprüft und bei Bedarf korrigiert, bis die Antwort endgültig feststeht oder die Anfrage zurückgezogen wird.

3. *Kontinuierliche Anfrage (Continuous Query):* Die Anfrage wird ständig bezüglich der aktuellen Zeit ausgewertet – die Zeit läuft mit. Nach Berechnung einer ersten, initialen Antwort wird diese ständig aktualisiert, bis die Anfrage zurückgezogen wird.

Wegen der Beschränkung auf Anfragen über die Gegenwart werden im Folgenden nur diskrete und kontinuierliche Anfragen betrachtet.

Bereits ohne räumlichen Bezug ist die effiziente Auswertung kontinuierlicher Anfragen in traditionellen Datenbanksystemen nicht möglich. Entsprechende Lösungen wurden zum Beispiel im Projekt Niagara entwickelt [CDWTW 2000]. Kontinuierliche Anfragen mit räumlichem Bezug sind Gegenstand vieler Forschungsarbeiten [BW 2001, CHC 2004, Mok 2004, SWCD 1997, XMA+ 2004].

Beweglichkeit Für die Auswertung kontinuierlicher Anfragen ist die Beweglichkeit der Anfrage und der angefragten Objekte von besonderer Bedeutung. Bei Anfragen, die ein gewisses Gebiet oder eine Nachbarschaft betreffen, unterscheidet [MAHP 2003] zwischen:

- *Stationäre Anfragen über mobile Objekte:* Das angefragte Gebiet, der angefragte Punkt einer Gebiets- beziehungsweise Nachbarschaftsanfrage steht still.

  Nach Berechnung der initialen Antwort muss lediglich überwacht werden, ob ein mobiles Objekt die Grenze des betroffenen Gebiets passiert beziehungsweise den Abstand des ermittelten nächsten Nachbarn zum angefragten Punkt oder Gebiet unterschreitet.

- *Bewegliche Anfragen über stationäre Objekte:* Das angefragte Gebiet, der angefragte Punkt einer Gebiets- beziehungsweise Nachbarschaftsanfrage bewegt sich. Theoretisch ist jede Bewegung denkbar. In der Forschung werden bisher nur Bewegungen parallel zu der eines mobilen Objekts betrachtet. In [GWYL 2004] wird ein solches Objekt „focal object“ genannt. Im Folgenden wird der Begriff Parameterobjekt verwendet.

  Nach Berechnung der initialen Antwort muss nur die Bewegung des Parameterobjekts überwacht werden.

- *Bewegliche Anfrage über mobile Objekte:* Im ersten Moment kann die Anfrage wie eine mobile Anfrage auf stationären Objekten ausgewertet werden – gegebenenfalls sind lediglich die momentanen Positionen der angefragten mobilen Objekte zu bestimmen. Nach Berechnung der initialen Antwort müssen die Bewegungen des Parameterobjekts und der angefragten mobilen Objekte überwacht werden.

Ereignistypen Ein Ereignis signalisiert das Eintreten einer vorab definierten Bedingung. Diese Bedingung wird auch Ereignisbedingung oder Auslöser beziehungsweise Trigger genannt [Wol 2002, Kapitel 1]. Die Ereignisbedingung wird vom Lokationsdienst ständig überprüft und das Ereignis bei Eintreten durch eine entsprechende Nachricht signalisiert. Ereignisse werden nach dem Englischen auch Events beziehungsweise spatial Events [NGS 2003] genannt. Häufig verwendete Ereignistypen nach [LK 1999] und [Dud 2002] sind:

- *onMeeting:* Informiert über das Treffen zweier Objekte.
- *onEnterArea:* Signalisiert das Betreten eines bestimmten Gebiets.
- *onLeaveArea:* Wird ausgelöst, wenn ein mobiles Objekt ein bestimmtes Gebiet verlässt.

Ereignisse sind mit kontinuierlichen Anfragen eng verwandt. Mit onEnterArea und onLeaveArea beispielsweise kann eine kontinuierliche Gebietsanfrage modelliert werden. Zunächst wird mit einer diskreten Gebietsanfrage die initiale Antwortmenge der enthaltenen mobilen Objekte bestimmt. Anschließend werden mit onEnterArea und onLeaveArea die Änderungen in der Antwortmenge ermittelt. Umgekehrt können ebenso Ereignisse durch kontinuierliche Anfragen modelliert werden.

Genauigkeit In vielen Arbeiten zur Verarbeitung von Anfragen im Lokationsmanagement, zum Beispiel [CHC 2004, Mok 2004, PXK+ 2002], wird die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems kaum betrachtet. In den eigentlichen Algorithmen wird die Position eines mobilen Objekts punktförmig angenommen.

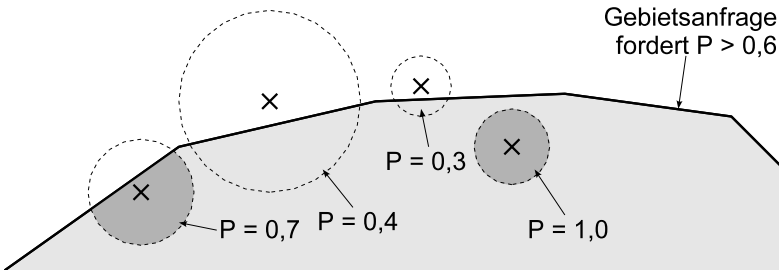


Abbildung 2.9: Aufenthaltswahrscheinlichkeit bei Gebietsanfragen

In [Leo 2003, Abschnitt 4.3] und [Dud 2002, Kapitel 5] wird die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems bei der Verarbeitung von Anfragen und der Auswertung von Ereignisbedingungen explizit betrachtet. In der Antwort auf eine Positionsanfrage wird die Genauigkeit der zurückgelieferten Position in Form eines Kreisradius mitgeteilt. Es wird angenommen, dass die tatsächliche Position mit gleichverteilter Wahrscheinlichkeit auf der zugehörigen Kreisscheibe um die angegebene Position liegt. Bei Gebietsanfragen wird in der Anfrage eine geforderte Aufenthaltswahrscheinlichkeit spezifiziert. Ein mobiles Objekt wird zur Antwort hinzugefügt, wenn es sich zu mindestens dieser Wahrscheinlichkeit in dem angefragten Gebiet befindet. Abbildung 2.9 zeigt ein mögliches Szenario mit einer geforderten Aufenthaltswahrscheinlichkeit von 60%. Dasselbe Prinzip wird für die Ereignisse onEnterArea und onLeaveArea verwendet.

Anfragesprachen Für räumliche oder räumlich-zeitliche Anfragen hat sich bisher keine Anfragesprache durchgesetzt.

Bekannte Entwicklungen sind SQL-Erweiterungen wie in [GBE+ 2000] beschrieben, die Future Temporal Logic (FTL) [SWCD 1997, WXCJ 1998] und die Augumented World Query Language (AWQL) [NGS 2003, Abschnitt 3.1].

2.7 Allgemeine Positionsübermittlung

Die zur Mobilkommunikation benötigte Positionsübermittlung erfolgt unabhängig von den im Folgenden vorgestellten Protokollen zur Positionsübermittlung an den Lokationsdienst.

Wie in Abschnitt 2.2 erläutert, muss ein mobiles Objekt dem Mobilkommunikationssystem melden, wenn es die Funkzelle beziehungsweise Location Area wechselt. Dazu übermittelt es die Kennung der neuen Funkzelle beziehungsweise Location Area an die stationäre Infrastruktur des Mobilkommunikationssystems. Die Kennung entnimmt das mobile Objekt speziellen Nachrichten, die die Basisstationen periodisch im Broadcast senden.

Positionsübermittlung bezeichnet im Folgenden die Übermittlung sehr viel genauerer Positionsdaten, die ein mobiles Objekt lokal bestimmt hat. Der Lokationsdienst nimmt die Positionsdaten entgegen und verwaltet sie für das mobile Objekt.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass der Lokationsdienst die Positionsdaten intern speichert [CHC 2004, Mok 2004, PXK+ 2002, Wol 2002]. Das ist nicht unbedingt notwendig. Theoretisch kann er bei jeder Anfrage die Positionen der betroffenen mobilen Objekte erneut erfragen. In [Leo 2003, Abschnitt 6.2.1] wird dieses Vorgehen einfaches anfragendes Protokoll genannt. Sinnvoll ist das einfache anfragende Protokoll nur in einigen Spezialanwendungen. In [Leo 2003] wird es lediglich zu Vergleichszwecken betrachtet.

Auch wenn der Lokationsdienst die Positionsdaten intern speichert, bedeutet das nicht, dass er damit alle Anfragen sofort beantworten kann. Die Aktualität der im Lokationsdienst gespeicherten Positionsdaten ist abhängig vom Protokoll zur Positionsübermittlung. Dazu gibt es zwei prinzipielle Vorgehensweisen:

1. *Reaktive Positionsübermittlung:* Positionsübermittlungen werden nur bei tatsächlichem Informationsbedarf durch Anfragen vorgenommen. Reichen die beim Lokationsdienst gespeicherten Positionsdaten eines mobilen Objekts nicht zur Beantwortung eine Anfrage aus, so fordert der Lokationsdienst das mobile Objekt zu einer Positionsübermittlung auf.

   In [Leo 2003, Abschnitt 6.2.1] wird dieses Vorgehen anfragendes Protokoll mit Zwischenspeichern genannt. Im Folgenden wird von einer Aufforderung zur Positionsübermittlung gesprochen.[1]

   Verbindungsabbrüche werden bei einer Aufforderung zur Positionsbestimmung sofort festgestellt. Die Zeit für das Senden der Aufforderung und den Empfang der Positionsübermittlung kann sich nachteilig auf die Verarbeitungszeit einer Anfrage auswirken, die Zeitspanne zwischen Anfrage und Beantwortung durch den Lokationsdienst. Dies gilt insbesondere, wenn viele mobile Objekte gleichzeitig zu einer Positionsübermittlung aufgefordert werden müssen.

2. *Proaktive Positionsübermittlung:* Die mobilen Objekte übermitteln ihre Position ohne Aufforderung entsprechend einem berichtenden Protokoll. Mögliche Protokolle aus [Leo 2003, Abschnitt 6.2.2] werden im Folgenden vorgestellt.

   Der Lokationsdienst kann Anfragen sehr rasch beantworten, da ihm die benötigten Positionsdaten jederzeit vorliegen.

   Allerdings übermitteln die mobilen Objekte ihre Position auch, wenn keine Anfrage vorliegt und der Lokationsdienst die Positionsdaten nicht benötigt.

Reaktive und proaktive Positionsübermittlung schließen sich nicht gegenseitig aus. Die Kombination beider Ansätze wird weiter unten, nach den berichtenden Protokollen, diskutiert.

Berichtende Protokolle Bei einem berichtenden Protokoll informiert ein mobiles Objekt den Lokationsdienst auf eigene Initiative hin über mögliche Positionsänderungen:

- *Einfach berichtendes Protokoll:* Sobald das Positionsbestimmungssystem eine noch so kleine Positionsänderung meldet, übermittelt das mobile Objekt dem Lokationsdienst die neuen Positionsdaten.

- *Zeitbasiert oder periodisch berichtendes Protokoll:* Das mobile Objekt übermittelt seine momentane Position periodisch an den Lokationsdienst.

- *Entfernungsbasiert berichtendes Protokoll:* Das mobile Objekt übermittelt seine Position nur, wenn es sich von der zuletzt übermittelten um eine gewisse Distanz entfernt hat. Voraussetzung für dieses Verfahren ist, dass die mobilen Objekte die zuletzt übermittelten Positionsdaten speichern.

[1] Zwischenspeichern beim Lokationsdienst ist sowieso gegeben und der Begriff Aufforderung birgt weniger Verwechslungsgefahr mit den eigentlichen Anfragen als der Begriff anfragendes Protokoll.

- *Koppelnavigationsprotokolle:* Streckenweise haben mobile Objekte oft vorhersehbare Bewegungsmuster. Häufig ist zum Beispiel eine geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit. Koppelnavigationsprotokolle nutzen diese Gegebenheit. Das mobile Objekt und der Lokationsdienst verwenden die gleiche Funktion, nach der sie künftige Positionen des mobilen Objekts vorherberechnen. Nur wenn das mobile Objekt um eine gewisse Entfernung von der vorherberechneten Position abweicht, übermittelt es seine Position – normalerweise zusammen mit einer neuen Vorhersagefunktion.

  Koppelnavigationsprotokolle unterscheiden sich in der Art der Vorhersagefunktionen und darin, welche Daten sie zur Berechnung der Vorhersagefunktionen verwenden. In [Leo 2003, Abschnitt 6.3] werden Koppelnavigationsprotokolle ohne Wegevorgabe und solche mit Wegenetz unterschieden.

  Für die erstgenannten eignen sich lineare Vorhersage und Vorhersage mit Funktionen höherer Ordnung.

  Sind Wegenetze bekannt, auf denen sich die mobilen Objekte bewegen, so kann kartenbasierte Koppelnavigation zum Einsatz kommen. Entsprechende Verfahren werden zum Beispiel in [ČJP 2005] diskutiert. In [ČJP 2005, Kapitel 5] werden zusätzlich so genannte Beschleunigungsprofile in der Vorhersagefunktion verwendet. In [WSCY 1999] wird Koppelnavigation auf vorher festgelegten Routen untersucht.

  Mehr zu typischen Bewegungsmustern auch in [SPRH 2004].

Das entfernungsbasiert berichtende Protokoll ist ein erster Versuch die Zahl der Positionsübermittlungen im Rahmen einer vorgegebenen Genauigkeit zu reduzieren. Hintergrund ist – neben dem Energieverbrauch der mobilen Objekte für eine Positionsübermittlung – die beschränkte Übertragungskapazität des Mobilkommunikationssystems und der Rechenaufwand für den Lokationsdienst. Letzterer muss seine interne Datenbank aktualisieren und den zugehörigen Index gegebenenfalls anpassen.

Die Koppelnavigationsprotokolle verfeinern das entfernungsbasiert berichtende Protokoll und reduzieren die Zahl der Positionsübermittlung noch weiter.

Problematisch sind Verbindungsabbrüche. Sie können ohne weitere Maßnahmen nur beim periodisch berichtenden Protokoll entdeckt werden. Wie Verbindungsabbrüche nach einer gewissen Zeitspanne auch bei Koppelnavigation garantiert erkannt werden können, wird in [WSCY 1999] diskutiert.

Kombinierte Protokolle Mit kombinierten Protokollen wird versucht, die Vorteile von Aufforderungen zur Positionsübermittlung und berichtenden Protokollen zu vereinen und Nachteile beider Ansätze auszugleichen.

Mit dem entfernungsbasiert berichtenden Protokoll oder einem Koppelnavigationsprotokoll kann garantiert werden, dass der Lokationsdienst die Position eines mobilen Objekts jederzeit grob kennt. Erfordert die Beantwortung einer Anfrage nur grobe Positionsdaten, so kann sie sehr rasch beantwortet werden. Andernfalls müssen die betroffenen mobilen Objekte zu einer Positionsübermittlung aufgefordert werden. Mit kombinierten Protokollen kann die Auslastung des Mobilkommunikationssystems durch Positionsübermittlungen und Aufforderungen gegenüber der durchschnittlichen Verarbeitungszeit von Anfragen abgewogen werden.

2.8 Positionsübermittlung bei kontinuierlichen Gebietsanfragen

Für kontinuierliche Gebietsanfragen existieren einige spezielle Verfahren zur Positionsübermittlung. Außer AMM informieren alle im Folgenden vorgestellten Verfahren die mobilen Objekte in irgendeiner Art und Weise über die angefragten Gebiete. Die mobilen Objekte übermitteln ihre Position nur, wenn sie sich den Rändern der angefragten Gebiete nähern oder diese überschritten haben. Dadurch soll, wie bei Koppelnavigationsprotokollen, die Übertragungskapazität des Mobilkommunikationssystems, die Rechenkapazität des Lokationsdienstes und der Energievorrat der mobilen Objekte geschont werden.

AMM Die Adaptive Monitor Method (AMM) aus [LUL+ 2001] basiert auf der Idee, dass mobile Objekte, die in der nächsten Zeit voraussichtlich nicht zur Antwort auf eine kontinuierliche ortsabhängige Anfrage gehören, ihre Position nur selten zu übermitteln brauchen. Zu den kontinuierlichen ortsabhängigen Anfragen gehören insbesondere kontinuierliche Gebietsanfragen. Die AMM unterscheidet drei Typen mobiler Objekte:

1. *Unselektierte Objekte:* Diese Objekte gehören in naher Zukunft voraussichtlich nicht zur Antwort auf eine kontinuierliche ortsabhängige Anfrage. Ein unselektiertes Objekt muss seine Position erst nach einer relativ langen Zeitspanne T_o erneut übermitteln.

2. *Selektierte Objekte:* Sie sind in der Antwort auf eine ortsabhängige Anfrage enthalten oder gehören voraussichtlich bald dazu.

   Ist ein mobiles Objekt bereits in einer Antwort enthalten, so muss es seine Position mit einer hohen Rate T_u^{-1} übermitteln.

   Ist ein mobiles Objekt noch nicht in einer Antwort enthalten, so bestimmt der Lokationsdienst eine Zeit T' mit $T_u \leq T' \leq T_o$, nach der es seine Position übermitteln muss. T' wird in Abhängigkeit davon gewählt, wann das mobile Objekt voraussichtlich zur Antwort gehören wird.

3. *Aktive Objekte:* So werden Parameterobjekte bei AMM genannt. Ein aktives Objekt muss seine Position periodisch mit Rate T_u^{-1} übermitteln.

Abhängig von der Zahl der Anfragen benötigt AMM weniger Positionsübermittlungen als ein einfaches Koppelnavigationsprotokoll.

SafeRegions In [PXK+ 2002] wird vorgeschlagen, dass der Lokationsdienst für jedes mobile Objekt einen Bereich, genannt SafeRegion, berechnet, innerhalb dessen sich das mobile Objekt bewegen kann, ohne die Grenze einer stationären Gebietsanfrage zu passieren. Bewegliche Gebietsanfragen werden nicht betrachtet. Nur wenn das mobile Objekt die SafeRegion verlässt, muss es seine Position übermitteln. Die in [PXK+ 2002, Abschnitt 4.1] genannten geometrischen Formen für die SafeRegions sind konzentrische Kreise um die zuletzt übermittelte Position und Rechtecke – SafeSphere und SafeRect genannt. Abbildung 2.10 zeigt mögliche SafeRegions zu gegebenen angefragten Gebieten.

Ähnlich dem SafeRect-Ansatz wird in [XMA+ 2004] vorgeschlagen, rechteckige NoAction-Gebiete für jedes mobile Objekt zu bilden. Allerdings werden diese nicht dem mobilen Objekt mitgeteilt, sondern ausschließlich innerhalb des Lokationsdienstes zur effizienten Anfrageverarbeitung verwendet. NoAction-Gebiete werden in diesem Zusammenhang auch für Parameterobjekte ermittelt.

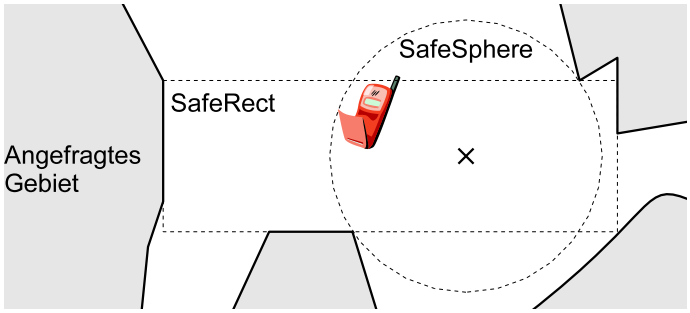


Abbildung 2.10: SafeSphere und SafeRect

MQM Beim Monitoring Query Management (MQM) aus [CHC 2004] werden den mobilen Objekten alle angefragten Gebiete in ihrer Nähe mitgeteilt. Dazu wird über das Dienstgebiet ein Gitternetz gelegt. Der Lokationsdienst teilt einem mobilen Objekt alle Gebietsanfragen der Gitterzelle mit, in der es sich gerade befindet. Entsprechend der Rechenkapazität eines mobilen Objekts werden diesem außerdem die angefragten Gebiete benachbarter und weiter entfernter Gitterzellen mitgeteilt. MQM wurde nur für stationäre Gebietsanfragen entwickelt.

Ein mobiles Objekt muss seine Position übermitteln, wenn es ein angefragtes Gebiet betritt oder verlässt oder wenn es eine Gitterzelle betritt, von der es die angefragten Gebiete nicht kennt.

MobiEyes MobiEyes [GL 2004] wurde speziell für bewegliche Gebietsanfragen entwickelt. Wie bei MQM wird ein Gitternetz über das Dienstgebiet gelegt. Ein mobiles Objekt wird über alle angefragten Gebiete der Gitterzelle informiert, in der es sich gerade befindet.

Ein mobiles Objekt, das kein Parameterobjekt ist, muss seine Position übermitteln, wenn es die Gitterzelle wechselt oder ein angefragtes Gebiet betritt oder verlässt. Parameterobjekte verwenden zur Positionsübermittlung ein Koppelnavigationsprotokoll.

Zur effizienteren internen Auswertung der Anfragen bei den mobilen Objekten wird in [GL 2004, Abschnitt 4.2] vorgeschlagen, aus dem Abstand eines mobilen Objekts zu einer beweglichen Gebietsanfrage und der Maximalgeschwindigkeit des mobilen Objekts und des Parameterobjekts eine Zeitspanne SafePeriod zu berechnen. Erst nach Ablauf von SafePeriod kann das mobile Objekt die Gebietsanfrage betreten haben, wie in Abbildung 2.11 dargestellt. Zuvor braucht das Betreten der Gebietsanfrage nicht geprüft zu werden.

Verteilte Anfrageverarbeitung Insbesondere MQM und MobiEyes sind mehr als Protokolle zur Positionsübermittlung. Die Anfragen werden vom Lokationsdienst und den mobilen Objekten gemeinsam verarbeitet. Es handelt sich um Verfahren zur verteilten Anfrageverarbeitung.

Wie bereits genannt, erfordert verteilte Anfrageverarbeitung normalerweise weniger Mobilkommunikation als berichtende Protokolle, bei denen die Anfragen nur vom Lokationsdienst verarbeitet werden. Es gibt einen weiteren Vorteil, der in den eben vorgestellten Arbeiten nicht genannt wird: Verteilte Anfrageverarbeitung ist dem entfernungsbasiert berichtenden Protokoll und den Koppelnavigationsprotokollen in der Genauigkeit überlegen.

Bei verteilter Anfrageverarbeitung können die mobilen Objekte nach jeder Positionsbestimmung prüfen, ob sie ein angefragtes Gebiet betreten oder verlassen haben. Beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll kann der Lokationsdienst dies erst nach einer neuerlichen

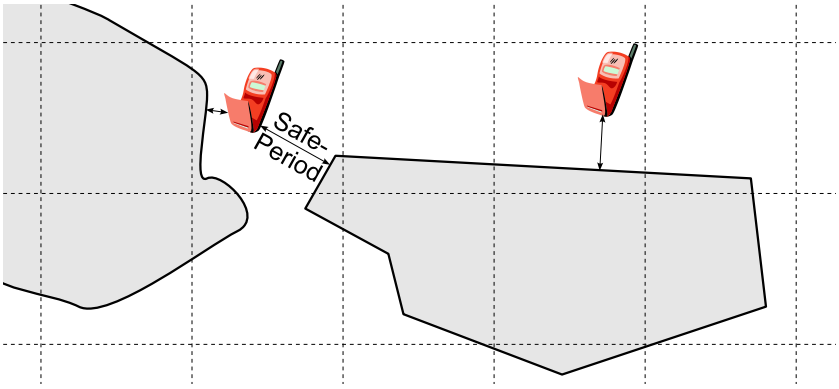


Abbildung 2.11: Gebietsanfragen und SafePeriods in einem Gitternetz

Positionsübermittlung prüfen. Da die Positionsübermittlung beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll unabhängig von den angefragten Gebieten erfolgt, kennt der Lokationsdienst die Position eines mobilen Objekts normalerweise nicht so genau wie dieses selbst. Der Lokationsdienst registriert das Betreten oder Verlassen eines angefragten Gebiets oft später als das mobile Objekt bei verteilter Anfrageverarbeitung. Gleiches gilt für Koppelnavigationsprotokolle.

2.9 Systemmodell

Das im Folgenden verwendete Systemmodell lässt sich direkt aus den oben genannten Grundlagen ableiten. Es berücksichtigt die üblichen Technologien und Anforderungen an Lokationsmanagementsysteme.

Lokationsmanagement Entsprechend dem Nexus-Projekt, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist, wird großflächiges Lokationsmanagement betrachtet. Mögliche Dienstgebiete sind Städte oder ganze Länder. Im Sinne der Weltmodelle aus Nexus ist auch globales Lokationsmanagement möglich. Hierarchie und Replikation innerhalb des Lokationsdienstes wird nicht betrachtet. Der Lokationsdienst ist verteilungstransparent.

Mobile Objekte Jedem mobilen Objekt ist eine eineindeutige Objekt-ID OID zugeordnet. Gruppen mobiler Objekte werden mit Gruppen-IDs GID bezeichnet. Jedem mobilen Objekt sind neben der eigenen Objekt-ID die Gruppen-IDs aller Gruppen bekannt, denen es zugeordnet ist. Der Lokationsdienst kennt alle Objekt-IDs und Gruppen-IDs und die Zusammensetzung der Gruppen.

Die mobilen Objekte können nicht nur ihre Position bestimmen und an den Lokationsdienst übermitteln, sie verfügen auch über genügend Rechenkapazität, eigene Positionsdaten mit denen anderer mobiler Objekte oder mit einigen Anfragen zu verarbeiten.

Mobilkommunikation Die Kommunikation zwischen mobilen Objekten und dem Lokationsdienst erfolgt über ein Mobilkommunikationsnetz im Infrastrukturmodus. Das Netz ist in Funkzellen aufgeteilt. Über das Mobilkommunikationsnetz ist dem Lokationsdienst die Position eines mobilen Objekts jederzeit auf eine oder wenige Funkzellen, die Location Area, genau bekannt.

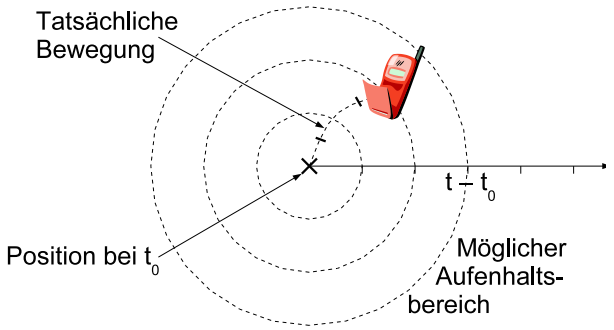


Abbildung 2.12: Möglicher Aufenthaltsbereich begrenzt durch $\hat{v}_{\mathrm{OID}}$

Kommunikation zwischen dem Lokationsdienst und den mobilen Objekten kann jederzeit erfolgen und von beiden Seiten initiiert werden. Die mobilen Objekte sind ständig empfangsbereit, auch wenn sie die Kommunikationsschnittstelle zur Energieschonung periodisch kurzzeitig abschalten.

Der Lokationsdienst kann eine Nachricht an ein einzelnes mobiles Objekt im Unicast oder an alle mobilen Objekte einer oder mehrerer Funkzellen im Broadcast senden. Außerdem kann eine Nachricht im Multicast in einer oder mehreren Funkzellen an vordefinierte Gruppen gesendet werden. Ein Multicast kann durch einen Broadcast realisiert werden, dessen Nachricht von allen mobilen Objekten verworfen wird, die nach Empfang des Nachrichtenkopfes feststellen, dass sie nicht zu den Empfängern gehören.

Der Energieverbrauch eines mobilen Endgeräts für Senden beziehungsweise Empfangen einer Nachricht hängt von der Nachrichtenlänge ab. Für die meisten im Folgenden betrachteten Nachrichten kann eine konstante Nachrichtenlänge angenommen werden, da sie im Vergleich zum Nachrichtenkopf, der Verwaltungsinformationen enthält, sehr kurz sind. Ausnahmen werden explizit genannt. Je Funkzelle ist der Nachrichtendurchsatz auf ein gewisses Produkt aus Nachrichtenanzahl und -länge begrenzt.

Mobilität Mobilen Objekten sind in ihrer Bewegungsfreiheit physikalische Grenzen gesetzt. Im Folgenden wird häufig die Maximalgeschwindigkeit $\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ verwendet.

Der momentan mögliche Aufenthaltsbereich eines mobilen Objekts ist ein Kreis um die letzte bekannte Position mit Radius $r(t) = \hat{v}_{\mathrm{OID}}\,(t - t_0)$, wie in Abbildung 2.12 gezeigt. t ist dabei die aktuelle Zeit und t_0 der Zeitpunkt, zu dem die letzten bekannten Positionsdaten bestimmt wurden. Die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems kann in die Berechnung des möglichen Aufenthaltsbereichs miteinbezogen werden [Leo 2003, Abschnitt 4.1].

Die Location Area, in der sich ein mobiles Objekt befindet, begrenzt dessen möglichen Aufenthaltsbereich. Der Lokationsdienst kann die Location Area, in der sich ein mobiles Objekt im Moment befindet, jederzeit vom Mobilkommunikationssystem erfragen.

Positionsbestimmung Die Positionsbestimmung ist verlustbehaftet und erfolgt bei den mobilen Objekten – nach [SBGP 2004, Kapitel 1] passive mobile Objekte genannt.

Für die hier betrachteten Szenarien und Dienstgebiete kommen insbesondere das verbreitete Positionsbestimmungssystem GPS, dessen Nachfolger Galileo und Positionsbestimmung in WLANs in Frage. Entsprechend werden nur geometrische Positionsdaten betrachtet.

Positionsdaten und deren Übermittlung Ein mobiles Objekt kann dem Lokationsdienst ältere Positionsdaten übermitteln. Bei einigen Anfragetypen reichen diese Daten für eine Beantwortung der Anfrage aus. Mit den Positionsdaten wird immer ein Zeitstempel übermittelt, der angibt, wann die Positionsdaten bestimmt wurden.

Anfragen und Ereignisse Im Folgenden werden die wichtigsten Anfragetypen in ihrer diskreten und in ihrer kontinuierlichen Variante betrachtet. Dies sind Positionsanfragen, Gebietsanfragen und Gebietspositionsanfragen. Damit werden auch die wichtigsten Ereignistypen implizit diskutiert, wie in Abschnitt 2.6 erläutert.

3 Problemstellung

In diesem Kapitel wird untersucht, wie viel Energie ein mobiles Objekt zum Lokationsmanagement benötigt. Anschließend werden existierende Ansätze zur Reduktion des Energieverbrauchs bewertet. Wie sich zeigt, schöpfen diese bei weitem nicht alle Möglichkeiten aus. In Abschnitt 3.3 wird kurz erläutert, wie die Zahl der Positionsbestimmungen an den tatsächlichen Bedarf der Anfragen angepasst werden kann. Zur Minimierung des Energieverbrauchs durch bedarfsgerechte Positionsbestimmung und -übermittlung sind viele Fragen zu klären. Diese sind in Abschnitt 3.4 zusammengestellt.

3.1 Energieverbrauch zum Lokationsmanagement

Lokationsmanagement ist für die mobilen Objekte mit erheblichem Energieverbrauch verbunden, im Wesentlichen zur Positionsbestimmung und zur Mobilkommunikation. Bei der Mobilkommunikation wird Energie zum Senden von Positionsübermittlungen und eventuellen Vorhersagefunktionen und zum Empfang von Nachrichten des Lokationsdienstes verbraucht.

Positionsbestimmung Der Energieverbrauch für eine einzelne Positionsbestimmung variiert von System zu System und ist oft von äußeren Faktoren abhängig, wie Hindernissen in der Nähe von Sensoren.

Eine Positionsbestimmung mit dem GPS-Empfänger FS Oncore beispielsweise verbraucht zwischen 62 und 1100 Millijoule, abhängig von der empfangenen Signalstärke [Mot 2003]. Der relativ hohe Energieverbrauch beschränkt die Betriebszeit üblicher, tragbarer GPS-Empfänger auf rund zehn Stunden [For 2005, Rik 2004].

Hersteller und Forschergruppen bemühen sich um besonders energieeffiziente GPS-Empfänger. Moderne GPS-Empfänger haben eine Leistungsaufnahme von rund 100 Milliwatt. In der Forschung werden teilweise noch kleinere Werte erreicht [GMB+ 2002, SSM+ 1998, Tri 2003, VCDC+ 2002]. Allein reichen diese Maßnahmen nicht aus, wie unten berechnet wird. Entgegengesetzte Entwicklungsziele, wie höhere Genauigkeit oder die Verfügbarkeit in Gebäuden, können die Leistungsaufnahme der GPS-Empfänger sogar erhöhen.

Viel Energie benötigt auch eine Positionsbestimmung in WLANs. Schon bei Laptops, relativ großen Mobilgeräten, kann die Mobilkommunikation 30% der gesamten Leistungsaufnahme ausmachen [Ath 2003]. Für kleinere Geräte ist dieser Wert größer, da die Leistungsaufnahme der Mobilkommunikationsschnittstelle kaum von der Gerätegröße abhängt. Zur Positionsbestimmung wird die WLAN-Schnittstelle nicht auf einem Kanal im Power-Save-Mode betrieben, wie bei Mobilkommunikation üblich. Stattdessen wird ständig auf vielen Kanälen nach Datenpaketen umliegender Access Points gehorcht. Die Leistungsaufnahme ist noch höher.

Mobilkommunikation Selbst bei sehr rechenintensiven Funktionen haben Hauptspeicher und Prozessor eines typischen PDAs eine geringere Leistungsaufnahme als die zugehörige WLAN-Schnittstelle beim Senden oder Empfangen [VBH 2003, VW 2003].

Bei GSM ist die starke Diskrepanz zwischen der Leistungsaufnahme bei Empfangsbereitschaft und der bei Senden oder Empfangen durch den signifikanten Unterschied zwischen

einigen Stunden Gesprächszeit und mehreren Tagen Bereitschaftszeit allgemein bekannt. Bei modernen Mobiltelefonen ist die Bereitschaftszeit bis zu 50-mal größer als die Gesprächszeit [Nok 2005, SE 2005b].

Zielsetzung Der Energieverbrauch eines mobilen Objekts für das Lokationsmanagement ist bisher inakzeptabel hoch. Die Kapazität eines Akkumulators für Mobiltelefone – beispielsweise das Modell Standard-Akku BST-27 mit 780 Milliampèrestunden bei 3 bis 3,6 Volt [SE 2005b] – beschränkt die Betriebszeit eines GPS-Empfängers mit 100 Milliwatt Leistungsaufnahme auf rund einen Tag. Wegen des zusätzlichen Energieverbrauchs für Mobilkommunikation muss der Energievorrat oft mehrmals am Tag aufgefrischt werden.

Für die Akzeptanz von Lokationsmanagementsystemen muss der Energieverbrauch reduziert werden, möglichst so, dass die Bereitschaftszeit der Mobilgeräte mit der heutiger PDAs oder Mobiltelefone vergleichbar wird.

3.2 Bewertung existierender Arbeiten

Die Forschung versucht seit einigen Jahren den Energieverbrauch zum Lokationsmanagement zu reduzieren. Im Folgenden werden wichtige Entwicklungen untersucht und bewertet.

Periodische Positionsbestimmung Bei den meisten Positionsbestimmungssystemen kann die Rate, mit der ein mobiles Objekt seine eigene Position bestimmt, eingestellt werden. Dies gilt insbesondere für GPS und Positionsbestimmung in WLANs.

Im kontinuierlichen Modus ist der Hochfrequenzverstärker ständig eingeschaltet. Die Position wird mit der technisch maximal möglichen Rate bestimmt. Wird die Rate kleiner als die technisch maximal mögliche gewählt, so schaltet der Empfänger seinen Hochfrequenzverstärker zwischen zwei Positionsbestimmungen ab und spart Energie. Wegen des periodischen Ein- und Ausschaltens des Hochfrequenzverstärkers wird von periodischer statt kontinuierlicher Positionsbestimmung gesprochen.

Periodische Positionsbestimmung wird bei GPS durch den TrickleMode explizit unterstützt. Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, kann die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Vergleich zur kontinuierlicher Positionsbestimmung um 80 bis 95% gesenkt werden.

Nachteil ist, dass die Position eines mobilen Objekts im Schnitt dadurch weniger genau bekannt ist. Im kontinuierlichen Modus können moderne GPS-Empfänger ihre Position in der Regel fünf Mal pro Sekunde bestimmen. Bei 100 Stundenkilometern legen sie zwischen zwei Positionsbestimmungen

$$100\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}} \cdot 200\,\mathrm{ms} = 27{,}78\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0{,}2\,\mathrm{s} = 5{,}56\,\mathrm{m}$$

zurück. Diese Entfernung liegt im Rahmen der Genauigkeit von GPS.

Im Trickle Mode kann die Positionsbestimmungsrate auf 0,1 Hertz gesenkt werden. Bei dieser Rate legt ein mobiles Objekt mit einer Geschwindigkeit von nur zehn Stundenkilometern zwischen zwei Positionsbestimmungen 27,78 Meter zurück. Für viele Anwendungen ist eine solche Ungenauigkeit inakzeptabel.

Prinzipiell eignet sich periodische Positionsbestimmung zur Energieschonung. Allerdings darf nicht dauerhaft dieselbe Rate verwendet werden – stattdessen sollte die Rate jeweils für eine gewisse Zeitspanne an den tatsächlichen Bedarf durch Anfragen angepasst werden.

Variable Positionsbestimmung Wie bei periodischer Positionsbestimmung, wird bei variabler durch temporäres Abschalten des Hochfrequenzverstärkers Energie gespart. Das mobile Objekt legt den Beginn jeder Positionsbestimmung, und damit das Einschalten des Hochfrequenzverstärkers, selbst fest.

Wie bei periodischer Positionsbestimmung kennt es seine Position im Schnitt weniger genau. Allerdings kann es die Position jederzeit genau erfragen. Im Gegenzug ist die Zeitspanne, die eine Positionsbestimmung beansprucht, als Verzögerung in Kauf zu nehmen.

Viele GPS-Empfänger unterstützen variable Positionsbestimmung durch einen speziellen Betriebmodus. Bekannte Entwicklungen sind PushToFix [Ubl 2000, Seite 7], SnapStart [KTNH 1998] und FixNow [Ubl 2002, Abschnitt 4.2.4]. In einem solchen Betriebsmodus nimmt der GPS-Empfänger selbstständig hin und wieder eine Positionsbestimmung vor, so dass die Position bei Bedarf relativ schnell bestimmt werden kann. Für viele Anwendungen wird dadurch ein sinnvolles Verhältnis zwischen Energieverbrauch und Verzögerung für eine Positionsbestimmung erreicht.

Variable Positionsbestimmung eignet sich hervorragend zur Energieschonung im Lokationsmanagement. Fordert der Lokationsdienst die mobilen Objekte vor jeder Positionsübermittlung dazu auf, so liegt es nahe, die Position nur nach Erhalt einer Aufforderung zu bestimmen. Der in Abschnitt 1.1 beschriebene Dienst Friendfinder verwendet dieses Prinzip.

Bisher wird variable Positionsbestimmung, wenn überhaupt, nur bei diskreten Positionsanfragen verwendet. Ob und wie variable Positionsbestimmung bei Gebiets- und Gebietspositionsanfragen und bei kontinuierlichen Positionsanfragen verwendet werden kann, ist zu untersuchen.

Positionsübermittlung im Allgemeinen Das entfernungsbasiert berichtende Protokoll und die Koppelnavigationsprotokolle wurden mit dem Ziel entwickelt, die Zahl der Positionsübermittlungen zu reduzieren. Damit wird nicht nur die Datenbank des Lokationsdienstes und die Übertragungskapazität des Mobilkommunikationssystems geschont, sondern auch der Energievorrat der mobilen Objekte.

Koppelnavigationsprotokolle erreichen beträchtliche Einsparungen. Zur Energieschonung sind sie unverzichtbar.

Allerdings werden sie meist mit einer konstanten Entfernung verwendet, die sich ein mobiles Objekt von der vermuteten Position maximal entfernen darf. Zur Minimierung des Energieverbrauchs ist diese Entfernung an den tatsächlichen Informationsbedarf der Anwendungen anzupassen.

Positionsübermittlung bei Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Speziell zur Positionsübermittlung bei Gebiets- und Gebietspositionsanfragen existieren einige Verfahren, die die Zahl der Positionsübermittlungen erheblich reduzieren und viel Energie sparen.

Die Idee hinter diesen Ansätzen, die Position möglichst nur bei Betreten oder Verlassen eines angefragten Gebiets zu übermitteln, ist zur Energieschonung sehr gut geeignet. Die in Abschnitt 2.8 vorgestellten Verfahren berücksichtigen allerdings nicht, wie viel Energie die mobilen Objekte zum Empfang von Nachrichten des Lokationsdienstes verbrauchen. Außerdem wurden die genannten Verfahren nur für kontinuierliche Gebiets- und Gebietspositionsanfragen entwickelt, beziehungsweise ihre Eignung für deren diskrete Varianten nicht untersucht.

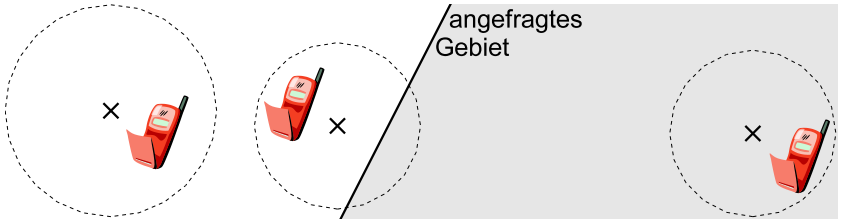


Abbildung 3.1: Mögliche Aufenthaltsbereiche am Rand eines angefragten Gebiets

Bewertung Zur Energieschonung im Lokationsmanagement existieren eine Reihe von Ansätzen. Sie beschränken sich aber immer auf einzelne Aspekte oder bestimmte Anfragetypen. Eine Gesamtlösung zur Minimierung des Energieverbrauchs fehlt.

Die Möglichkeiten der variablen Positionsbestimmung werden bisher kaum genutzt, obwohl durch Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen erheblich Energie gespart werden kann.

3.3 Lösungsidee zur Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen

Viele existierende Lokationsmanagementsysteme verwenden kontinuierliche oder periodische Positionsbestimmung – der tatsächliche Bedarf der Anfragen wird nicht berücksichtigt.

Abhängig vom Anfragetyp lässt sich die Zahl der Positionsbestimmungen prinzipiell wie folgt minimieren:

- *Positionsanfragen:* Alle mobilen Objekte, über die keine Anfragen vorliegen, können auf Positionsbestimmungen ganz verzichten. Ein angefragtes mobiles Objekt muss seine Position nur bestimmen, wenn es sich von der zuletzt bestimmten Position merklich entfernt haben kann.

- *Gebietsanfragen:* Angefragte mobile Objekte müssen ihre Position nur bestimmen, wenn unklar ist, ob sie sich momentan inner- oder außerhalb des angefragten Gebiets aufhalten. Aus der zuletzt bestimmten Position, der Zeit, die seither verstrichen ist, und der Maximalgeschwindigkeit lässt sich für jedes mobile Objekt der momentan mögliche Aufenthaltsbereich – ein Kreis – berechnen. Nur wenn die Kreisscheibe weder ganz innernoch ganz außerhalb des angefragten Gebiets ist, so ist eine erneute Positionsbestimmung erforderlich.[1] Abbildung 3.1 stellt ein mögliches Szenario dar: Zur Beantwortung der Anfrage muss nur das mobile Objekt in der Mitte seine Position bestimmen.

  Bei kontinuierlichen Gebietsanfragen muss berücksichtigt werden, wie die möglichen Aufenthaltsbereiche mit der Zeit wachsen. Je näher ein mobiles Objekt dem Rand einer Gebietsanfrage ist, desto häufiger muss es seine Position bestimmen – unabhängig davon, ob es das angefragte Gebiet betritt oder verlässt. Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft, wo ein mobiles Objekt seine Positionen bestimmt hat, damit der Lokationsdienst möglichst genau erkennen konnte, wann es den Rand des angefragten Gebiets überschreitet.

[1] Mathematisch wird der momentan mögliche Aufenthaltsbereich – eine kreisförmige Fläche – mit dem Rand des angefragten Gebiets – einem geschlossenen Kurven- oder Kantenzug – geschnitten. Ist die Schnittmenge nicht leer, so ist eine Positionsbestimmung erforderlich.

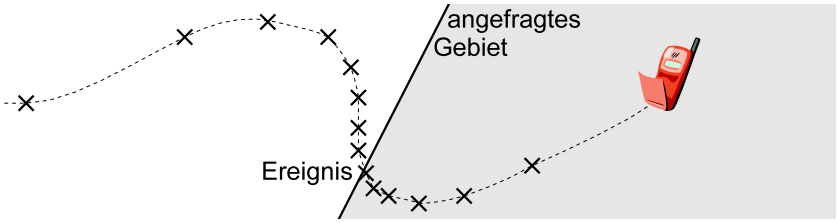


Abbildung 3.2: Positionsbestimmungen beim Betreten eines angefragten Gebiets

- *Gebietspositionsanfragen* Innerhalb des angefragten Gebiets müssen die angefragten mobilen Objekte ihre Position bestimmen, wenn sie sich von der zuletzt bestimmten Position merklich entfernt haben können. Die anderen angefragten mobilen Objekte müssen ihre Position nur dann bestimmen, wenn sie das angefragte Gebiet inzwischen betreten haben können, das heißt, wenn ihr möglicher Aufenthaltsbereich das angefragte Gebiet schneidet.

3.4 Offene Fragen

Die eben dargestellten Ansätze zur Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen lassen viele Fragen offen. Diese werden in der Reihenfolge genannt, wie sie in den nächsten Kapiteln diskutiert werden.

Anfrageschnittstelle Zur Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen, und damit zur Energieschonung, muss der Lokationsdienst die Anfragen und die Verwendung der Antworten möglichst genau kennen. Ansonsten kann er die mobilen Objekte nicht instruieren, so wenige Positionsbestimmungen wie benötigt vorzunehmen.

Dazu müssen die Anwendungen ihren tatsächlichen Informationsbedarf in der Anfrageschnittstelle möglichst genau spezifizieren können. Zwei Aspekten kommt besondere Bedeutung zu: Zum Ersten kontinuierlichen Anfragen. Einige Lokationsmanagementsysteme sehen kontinuierliche Anfragen nicht vor. Zu untersuchen ist:

- Werden kontinuierliche Anfragen zur Energieschonung benötigt?
- Wie können sie in der Anfrageschnittstelle spezifiziert werden?

Zum Zweiten Genauigkeit und Toleranz. Bekannt ist, dass mobile Objekte, die von keiner Anfrage betroffen sind, ihre Position nicht zu bestimmen brauchen. Offen ist, wie häufig angefragte mobile Objekte bei Positionsanfragen oder nahe dem Rand einer Gebietsanfrage ihre Position bestimmen müssen. Gleiches gilt bei Gebietspositionsanfragen nahe oder innerhalb des angefragten Gebiets.

Dies hängt davon ab, welche Verzögerungen oder Ungenauigkeiten eine Anwendung in der Antwort auf eine Anfrage tolerieren kann. Je größer die Toleranz, desto weniger Positionsbestimmungen und -übermittlungen sind nötig und desto geringer ist der Energieverbrauch eines mobilen Objekts. Zu untersuchen ist:

- Wie kann eine Anwendung mögliche Toleranzen spezifizieren?
- Wie ist die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen an die Toleranz anzupassen?

- Wie ist mit unterschiedlichen Toleranzen bei mehreren Anfragen gleichzeitig umzugehen?

Anfrageverarbeitung Damit ein mobiles Objekt die Zahl der Positionsbestimmungen und damit auch der Positionsübermittlungen an den tatsächlichen Bedarf der Anfragen anpassen kann, muss ihm der Lokationsdienst die Anfragen in geeigneter Form mitteilen. Abhängig von den Anfragen und dem momentan möglichen Aufenthaltsbereich kann das mobile Objekt entscheiden, ob beziehungsweise wann es seine Position bestimmen oder übermitteln muss.

Die Verarbeitung der Anfragen erfolgt nicht alleine beim Lokationsdienst, sondern in Kooperation mit den mobilen Objekten. Dafür sind viele Verfahren und Ansätze denkbar. Zu untersuchen ist:

- Welche Verfahren und Ansätze gibt es prinzipiell?
- Wie kann der Lokationsdienst die mobilen Objekte geeignet über die Anfragen informieren?

Der Energieverbrauch bei Verwendung eines bestimmten Verfahrens hängt von mehreren Faktoren ab. Die wichtigsten sind das Verhältnis der Energiekosten für Positionsbestimmung zu denen für Mobilkommunikation und die Anfragelast, das heißt die Zahl und Art der Anfragen. Zu untersuchen ist:

- Welches Verfahren minimiert bei welchen Anfragelasten den Energieverbrauch?
- Wie können die Verfahren an ein konkretes Energiekostenverhältnis angepasst werden?

4 Erweiterung der Anfrageschnittstelle

In diesem Kapitel wird untersucht, wie die Anfrageschnittstelle zu erweitern ist, damit die Anwendungen und Dienste ihren Informationsbedarf in den Anfragen möglichst genau spezifizieren können. Zunächst werden kontinuierliche Anfragen und deren Planung betrachtet. Anschließend wird Toleranz in zwei Varianten – zeitlich und räumlich – untersucht. In Abschnitt 4.5 werden mögliche Kombinationen der räumlichen Toleranz mit der Genauigkeit eines Positionsbestimmungssystems vorgestellt. Anschließend wird untersucht, wie zeitliche und räumliche Toleranz kombiniert werden können.

4.1 Kontinuierliche Anfragen

In vielen ortsbezogenen Anwendungen und Diensten besteht der Bedarf, ein bestimmtes mobiles Objekt oder alle mobilen Objekte in einem gewissen Gebiet über einen längeren Zeitraum zu beobachten.

- *Beobachten eines mobilen Objekts:* Nach dem Englischen auch Tracking genannt. Die Bewegung des mobilen Objekts und seine momentane Position werden unmittelbar verfolgt.

  Ein bekanntes Beispiel ist das Flottenmanagement. Dabei werden alle Fahrzeuge einer Organisation oder eines Unternehmens getrackt. In einer Spedition kann damit bei einem neuen, dringenden Auftrag sofort der nächste LKW mit entsprechender Ladekapazität ermittelt werden. Werden Frachtcontainer mit entsprechender Hardware ausgestattet, so lässt sich deren Transportweg in Echtzeit überwachen.

- *Beobachten eines Gebiets:* Durch ständiges Beobachten eines gewissen Gebiets ist nicht nur jederzeit bekannt, welche mobilen Objekte sich darin aufhalten, sondern es wird auch sofort erkannt, wenn ein mobiles Objekt das Gebiet betritt oder verlässt. Ein Kino beispielsweise könnte potentiellen Besuchern eine Filmvorschau anbieten, sobald diese vor das entsprechende Plakat treten.

Ständige Beobachtung kann durch eine Vielzahl einzelner diskreter Anfragen modelliert werden. Beim Transportweg eines Containers kann möglicherweise eine Positionsanfrage pro Minute ausreichen, zur Beobachtung des Gebiets vor einem Filmplakat eine Gebietsanfrage alle fünf Sekunden.

Wird statt vieler diskreter Anfragen eine kontinuierliche verwendet, so können die mobilen Objekte Energie sparen:

- *Weniger Nachrichten vom Lokationsdienst:* Bei diskreten Anfragen müssen die mobilen Objekte ständig ähnliche Nachrichten empfangen, in denen sie der Lokationsdienst über die Anfrage geeignet informiert. Bei einer kontinuierlichen Anfrage reicht eine Nachricht.

- *Weniger Positionsübermittlungen:* Informiert der Lokationsdienst ein mobiles Objekt über eine diskrete Anfrage, so erwartet er häufig eine Positionsübermittlung, auch dann,

wenn sich die Antwort kaum oder gar nicht geändert hat. Bei einer kontinuierlichen Anfrage können die mobilen Objekte selbst entscheiden, wann eine Positionsübermittlung erforderlich ist. Mit Koppelnavigationsprotokollen oder den in Abschnitt 2.8 vorgestellten Verfahren zur Verarbeitung von kontinuierlichen Gebiets- und Gebietspositionsanfragen können viele Positionsübermittlungen gespart werden.

Auch sonst haben kontinuierliche Anfragen eine Reihe von Vorteilen. Der Verwaltungsaufwand für den Lokationsdienst ist kleiner als bei vielen diskreten Anfragen und das Kommunikationssystem wird geschont. Änderungen in der Antwort werden rasch übertragen, da sich der Lokationsdienst und die angefragten mobilen Objekte auf die kontinuierliche Anfrage „einrichten“ können.

Syntaktisch können kontinuierliche Anfragen wie diskrete Anfragen formuliert werden. Zusätzlich ist lediglich die Lebensdauer der Anfrage anzugeben. Nach Ablauf der Lebensdauer wird die Anfrage nicht weiter beantwortet und der Lokationsdienst kann sie intern löschen.

Häufig ist die Lebensdauer vorab nicht bekannt. In diesen Fällen sollte kein Standardwert für die Lebensdauer verwendet werden. Sonst muss die Anfrage immer wieder neu gestellt werden und die mobilen Objekte verbrauchen unnötig Energie für den Empfang der entsprechenden Nachrichten. Stattdessen sollte unendliche Lebensdauer angenommen werden. Die anfragende Anwendung erhält vom Lokationsdienst eine Kennung, die die Anfrage eindeutig bezeichnet. Möchte sie die Anfrage zurückziehen, so sendet sie eine entsprechende Nachricht an den Lokationsdienst, der diese Information in geeigneter Form an die mobilen Objekte weiterleitet.

4.2 Toleranz

Die Antwort auf eine Anfrage ist, außer der Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems, auch noch Fehlern und Ungenauigkeiten unterworfen, die durch das Protokoll zur Positionsübermittlung und durch Verzögerungen entstehen.

Wird zur Positionsübermittlung ein Koppelnavigationsprotokoll verwendet, so beantwortet der Lokationsdienst die Anfragen mit vermuteten Positionen. Die tatsächliche Position eines mobilen Objekts kann um die Entfernung abweichen, innerhalb der es seine Position nicht übermitteln muss.

Wird statt eines Koppelnavigationsprotokolls ein periodisch berichtendes Protokoll verwendet, so legt die Periodendauer den maximal möglichen Fehler fest. Im ungünstigsten Fall wird eine Anfrage kurz vor der nächsten Positionsübermittlung gestellt. Wartet der Lokationsdienst diese nicht ab, so wird die Anfrage mit Positionsdaten beantwortet, die um die Periodendauer veraltet sind.

Bei Positions- und Gebietspositionsanfragen sind die in der Antwort gegebenen Positionsdaten dadurch ungenau. Bei diskreten Gebietsanfragen kann die Antwort auf Grund dieser Ungenauigkeiten Objekt-IDs mobiler Objekte enthalten, die sich knapp außerhalb des angefragten Gebiets aufhalten. Umgekehrt können Objekt-IDs mobiler Objekte fehlen, die sich knapp innerhalb des angefragten Gebiets aufhalten.

Häufig wird ein festes Protokoll zur Positionsübermittlung verwendet und dessen Parameter konstant gewählt. Je nach Protokoll und Wahl der Parameter treten in den Antworten weniger oder mehr Fehler und kleinere oder größere Ungenauigkeiten auf.

Nur selten wird das Protokoll zur Positionsübermittlung an die Anforderungen der anfragenden Anwendungen angepasst. In [Leo 2003, Abschnitt 6.4.3] wird vorgeschlagen, zur Positionsübermittlung ein entfernungsbasiert berichtendes Protokoll zu verwenden und bei Bedarf

die mobilen Objekte zu zusätzlichen Positionsübermittlungen aufzufordern. In [WSCY 1999, Kapitel 4] wird ein adaptives Koppelnavigationsprotokoll vorgeschlagen, das die Summe dreier Kostenfunktionen – Ungenauigkeit der Positionsdaten bei der anfragenden Anwendung, Positionsübermittlung und Abweichung der tatsächlichen von der vermuteten Position – minimiert.

Zur Minimierung des Energieverbrauchs sollten nicht mehr Positionsdaten übermittelt werden, als die anfragenden Anwendungen tatsächlich benötigen. Die Zahl der Positionsbestimmungen muss daran angepasst werden. Dazu muss der Lokationsdienst wissen, welche Ungenauigkeiten und Fehler die anfragenden Anwendungen tolerieren. Dies kann bei jeder Anfrage anders sein.

Bei einem Kartenausschnitt beispielsweise hängt die erlaubte Toleranz vom gewählten Maßstab ab. Für den in Abschnitt 1.1 genannten Dienst, der die aktuelle Zahl an Kinobesuchern abschätzt, sind einige Sekunden Toleranz akzeptabel. Besucher, die das Kino gerade erst betreten haben, werden eventuell nicht gezählt. Umgekehrt können Besucher, die das Kino gerade verlassen haben, noch mitgezählt werden. Der durch die Toleranz eingeführte Fehler ist normalerweise gering gegenüber den tatsächlichen Besucherzahlen.

In den nächsten Abschnitten wird untersucht, welche Arten von Toleranz es gibt und wie sie kombiniert werden können. Auch die Kombination mit der Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems wird untersucht. Es werden nur Positions- und Gebietsanfragen betrachtet. Aus der Wirkung der Toleranz auf diese, ergibt sich unmittelbar die Wirkung bei Gebietspositionsanfragen.

4.3 Zeitliche Toleranz

Wird in einer Anfrage eine zeitliche Toleranz T_A erlaubt, so können zur Beantwortung ältere Positionsdaten verwendet werden. Für die verschiedenen Anfragetypen bedeutet dies im Detail Folgendes:

- *Diskrete Positionsanfrage:* Die in der Antwort enthaltenen Positionsdaten sind nicht älter als T_A. Das heißt, sie sind nach dem Zeitpunkt $t - T_A$ ermittelt worden, wobei t die aktuelle Zeit ist.

- *Kontinuierliche Positionsanfrage:* Die zeitliche Toleranz legt fest, dass die Antwort spätestens nach der Zeitspanne T_A aktualisiert wird. Der anfragenden Anwendung stehen stets Positionsdaten zur Verfügung, die nicht älter als T_A sind.

- *Diskrete Gebietsanfrage:* Die Antwort auf die Gebietsanfrage ist für alle mobilen Objekte korrekt, die sich seit $t-T_A$ nur inner- oder nur außerhalb des angefragten Gebiets aufgehalten haben. Je nachdem wird ihre Objekt-ID in der Antwort genannt oder nicht.

  Bei mobilen Objekten, die den Rand der Anfrage erst vor kurzem, im Intervall $[t-T_A, t]$, passiert haben, kann die Antwort veraltet sein. Ihre Objekt-ID kann in der Antwort enthalten sein oder nicht, unabhängig davon, wo sie sich momentan befinden.

- *Kontinuierliche Gebietsanfrage:* Wie bei der diskreten Variante ist die Antwort stets korrekt, wenn sich ein mobiles Objekt seit $t - T_A$ nur inner- oder nur außerhalb des angefragten Gebiets aufgehalten hat.

  Betritt ein mobiles Objekt das angefragte Gebiet, so wird seine Objekt-ID spätestens nach der Zeitspanne T_A zur Antwort hinzugefügt. Entsprechendes gilt beim Verlassen des angefragten Gebiets.

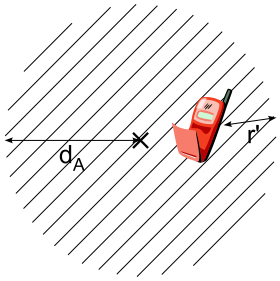


Abbildung 4.1: Räumliche Toleranz bei einer Positionsanfrage

Wenn ein mobiles Objekt das angefragte Gebiet betritt und innerhalb der Zeitspanne T_A wieder verlässt, so kann dies unentdeckt bleiben. Das gleiche gilt, wenn ein mobiles Objekt das angefragte Gebiet für eine Zeitspanne kürzer als T_A verlässt und dann wieder zurückkehrt.

Wie zeitliche Toleranz bei der Verarbeitung von Anfragen zur Energieschonung genutzt werden kann, wird unten detailliert erläutert.

Bereits jetzt lässt sich erkennen, dass nach Abschluss einer Positionsbestimmung die nächste frühestens nach der Zeitspanne $T_A - T_{B_{min}}$ begonnen werden muss, so dass die neuen Positionsdaten nach der Zeitspanne T_A vorliegen. $T_{B_{min}}$ ist die Zeitspanne, die ein mobiles Objekt zur Bestimmung seiner Position benötigt. Eine zeitliche Toleranz kleiner $T_{B_{min}}$ ist unmöglich.

Die zeitliche Toleranz begrenzt die maximal benötigte Positionsbestimmungsrate auf T_A^{-1}. Das gleiche gilt für die Positionsübermittlungsrate, da mehr Positionsübermittlungen als -bestimmungen nutzlos sind.

Dementsprechend wird die durchschnittliche Leistungsaufnahme für Positionsbestimmungen und -übermittlungen begrenzt. Je größer die zeitliche Toleranz, desto mehr Energie kann gespart werden.

4.4 Räumliche Toleranz

Wird in einer Anfrage eine räumliche Toleranz d_A erlaubt, so können zur Beantwortung Positionsdaten verwendet werden, von denen die momentan möglichen Positionen um die Entfernung d_A abweichen können. Für die verschiedenen Anfragetypen gilt:

- *Diskrete Positionsanfrage:* Die in der Antwort angegebene Position weicht maximal um d_A von der momentanen Position des angefragten mobilen Objekts ab. Die anfragende Anwendung erfährt die Position des mobilen Objekts nur auf einen Kreis mit Radius d_A genau.

  Dieser Kreis wird Toleranzkreis genannt. Die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems kann dabei berücksichtigt werden, wie in Abschnitt 4.5 erläutert wird. Abbildung 4.1 zeigt einen möglichen Toleranzkreis.

- *Kontinuierliche Positionsanfrage:* Die durch die Antwort bekannte Position kann, wie bei der diskreten Variante, um bis zu d_A von der momentanen Position des mobilen Objekts abweichen. Spätestens, wenn das mobile Objekt den Toleranzkreis verlässt, wird die Antwort aktualisiert.

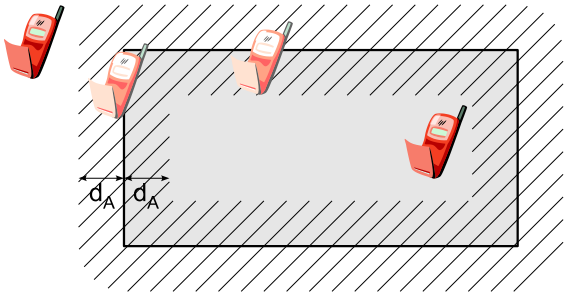


Abbildung 4.2: Räumliche Toleranz bei einer Gebietsanfrage

- *Diskrete Gebietsanfrage* Durch die räumliche Toleranz entsteht um den Rand des angefragten Gebiets ein Streifen der Breite $2d_A$. Er wird fortan Toleranzstreifen genannt. Abbildung 4.2 stellt ihn dar.

  Die Antwort auf die Anfrage ist bezüglich aller mobilen Objekte korrekt, die sich momentan außerhalb des Toleranzstreifens aufhalten. Hält sich ein mobiles Objekt innerhalb des angefragten Gebiets und außerhalb des Toleranzstreifens auf, so ist seine Objekt-ID in der Antwort enthalten. Hält sich ein mobiles Objekt außerhalb des angefragten Gebiets und außerhalb des Toleranzstreifens auf, so gehört seine Objekt-ID nicht zur Antwort.

  Bei mobilen Objekten, die sich auf dem Toleranzstreifen befinden, kann die Antwort fehlerhaft sein – ihre Objekt-ID kann beliebig in der Antwort enthalten sein oder nicht.

- *Kontinuierliche Gebietsanfrage* Die räumliche Toleranz wirkt wie bei der diskreten Variante und erzeugt den gleichen Toleranzstreifen.

  Spätestens, wenn ein mobiles Objekt den Toleranzstreifen verlässt, wird die Antwort korrigiert und die anfragende Anwendung über die Änderung informiert.

Mit räumlicher Toleranz können die durchschnittliche Positionsbestimmungsrate und -übermittlungsrate auf $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/d_A$ begrenzt werden. Nach einer Positionsbestimmung muss die nächste frühestens nach der Zeitspanne $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}} - T_{B_{min}}$ begonnen werden, so dass sie nach der Zeitspanne $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ beendet ist. Eine räumliche Toleranz kleiner $\hat{v}_{\mathrm{OID}} T_{B_{min}}$ ist unmöglich.

Räumliche Toleranz bietet einen größeren Spielraum als zeitliche. In Abschnitt 5.4 wird gezeigt, wie die Zahl der Positionsübermittlungen teilweise gegenüber der Zahl der Positionsbestimmungen abgewogen werden kann.

Allgemein gilt: Je größer die räumliche Toleranz, desto mehr Energie kann gespart werden.

4.5 Genauigkeit und räumliche Toleranz

Räumliche und zeitliche Toleranz kann beliebig und unabhängig von der Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems gewählt werden. Trotzdem sind räumliche Toleranz und Genauigkeit in ihrer Wirkung verwandt.

Bei Positionsdaten gibt die räumliche Toleranz d_A die maximale Abweichung zwischen der momentanen und der in der Antwort gegebenen Position an. Dies ist vergleichbar mit der maximalen Abweichung g_B zwischen der tatsächlichen Position eines mobilen Objekts und der im Moment bestimmten Position, wie sie bei vielen Positionsbestimmungssystemen angegeben wird.

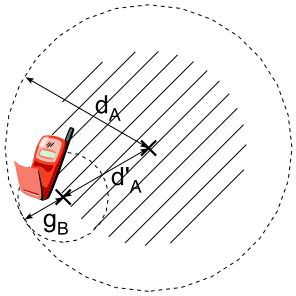


Abbildung 4.3: Räumliche Toleranz und Genauigkeit kombiniert bei einer Positionsanfrage

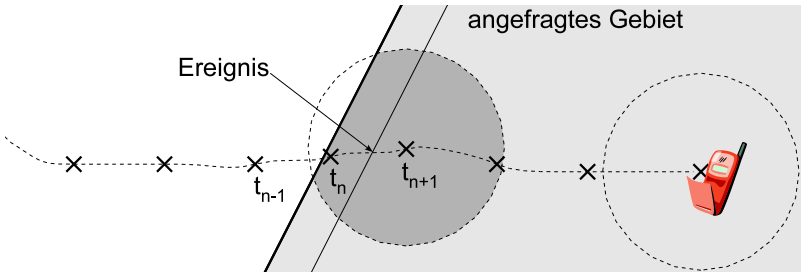


Abbildung 4.4: Genauigkeit beim Betreten eines angefragten Gebiets

Innerhalb des Toleranzkreises kann sich das mobile Objekt an jedem Punkt aufhalten. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit ist in der Regel nicht gleichverteilt. Am Rand ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit deutlich geringer als in der Mitte. Vergleichbar damit, wurden in Abschnitt 2.3 Dichtefunktionen vorgestellt, mit denen die Genauigkeit eines Positionsbestimmungssystems beschrieben werden kann.

Werden Genauigkeit und räumliche Toleranz kombiniert, so kann die Anfrageschnittstelle vereinfacht werden. In Anfragen oder Antworten wird nur ein Wert für beides angegeben.

Positionsanfragen Wird die maximale Abweichung g_B von der räumlichen Toleranz d_A subtrahiert und die Differenz als neue räumliche Toleranz d'_A verwendet, so wird einer anfragenden Anwendung garantiert, dass sie die tatsächliche Position jederzeit im Rahmen der räumlichen Toleranz kennt. Abbildung 4.3 stellt diese Kombination dar.

Gebietsanfragen In Abschnitt 2.6 wurde erläutert, wie über die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems das Enthaltensein in einem angefragten Gebiet neu definiert werden kann. Dazu wird in der Anfrage eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit gefordert. Ein mobiles Objekt gehört nur dann zur Antwort, wenn es sich zu mindestens dieser Wahrscheinlichkeit in dem angefragten Gebiet aufhält.

Abbildung 4.4 zeigt ein angefragtes Gebiet. In der kontinuierlichen Gebietsanfrage wird eine Aufenthaltswahrscheinlichkeit von 70% gefordert. Der konzentrische Kreis um das mobile Objekt beziehungsweise um die zum Zeitpunkt t_{n+1} bestimmte Position soll die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems andeuten. Sie muss aber nicht gleichverteilt sein.

Die Positionsbestimmung zum Zeitpunkt t_n ergibt, dass sich das mobile Objekt zu 55% Wahrscheinlichkeit in dem angefragten Gebiet aufhält. Es gehört noch nicht zur Antwort.

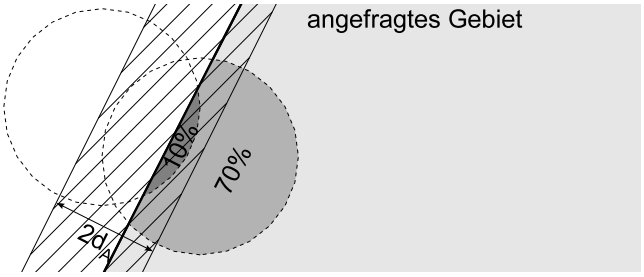


Abbildung 4.5: Toleranz durch Genauigkeitsintervall beschrieben

Die Positionsbestimmung zum Zeitpunkt t_{n+1} ergibt eine Wahrscheinlichkeit von 90%. Die anfragende Anwendung wird erst direkt nach dem Zeitpunkt t_{n+1} darüber informiert, dass das mobile Objekt das angefragte Gebiet betreten hat, obwohl das Ereignis früher, zwischen den Zeitpunkten t_n und t_{n+1} eingetreten ist. Über die Toleranz wird der zeitliche Abstand $t_{n+1} - t_n$ zwischen beiden Positionsbestimmungen eingestellt. Auch ohne Toleranz würde der Zeitpunkt zwischen t_n und t_{n+1}, bei dem die Wahrscheinlichkeit gerade 70% beträgt, wegen der Begrenzung durch die maximal mögliche Positionsbestimmungsrate $T_{B_{min}}^{-1}$ normalerweise nicht exakt erfasst.

Die diagonale Linie rechts vom Rand des angefragten Gebiets soll andeuten, dass die geforderte Aufenthaltswahrscheinlichkeit von 70% den Rand des angefragten Gebiets lediglich verschiebt, abhängig von der Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems.[1] Würde bei der Anfrageverarbeitung diese Linie als Rand verwendet, so müsste die Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems nicht berücksichtigt werden. Allerdings müsste wegen der unterschiedlichen Genauigkeiten jedes Positionsbestimmungssystem separat betrachtet werden.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, Genauigkeit und räumliche Toleranz bei Gebietsanfragen zu kombinieren. Je nach Anwendung sind zwei Argumentationen möglich:

1. *Je höher die Genauigkeit, desto geringer die räumliche Toleranz:* Bietet ein Positionsbestimmungssystem eine hohe Genauigkeit und soll diese genutzt werden, so muss die räumliche Toleranz klein gewählt werden. Andernfalls wird die hohe Genauigkeit durch die räumliche Toleranz versteckt. Umgekehrt kann die räumliche Toleranz bei einem Positionsbestimmungssystem mit geringer Genauigkeit groß gewählt werden.

   Diese Anpassung der räumlichen Toleranz an die Genauigkeit lässt sich einfach umsetzen, indem für die geforderte Aufenthaltswahrscheinlichkeit statt eines einzelnen Wertes ein Intervall angegeben wird. Abbildung 4.5 zeigt, wie sich aus dem Intervall $[10\%, 70\%]$ bei konkreter Genauigkeit die räumliche Toleranz d_A ergibt. Bei einer konkreten Verteilungsfunktion für die Genauigkeit ergeben sich aus den beiden Intervallgrenzen zwei zum Rand des angefragten Gebiets verschobene Linien. Als räumliche Toleranz d_A wird der halbe Abstand zwischen den beiden Linien gewählt. Liegt eine ermittelte Position zwischen den beiden Linien, so hält sich das mobile Objekt mit einer Wahrscheinlichkeit zwischen 10 und 70% in dem angefragten Gebiet auf. Die Antwort muss in diesem Bereich, dem Toleranzstreifen, nicht korrekt sein. Bei allen anderen Aufenthaltswahrscheinlichkeiten, das heißt außerhalb des Toleranzstreifens, ist die Antwort stets korrekt.

[1] Bei geraden Abschnitten im Rand des angefragten Gebiets ist dies eine Parallelverschiebung. An Kurven ist die Verschiebung komplizierter.

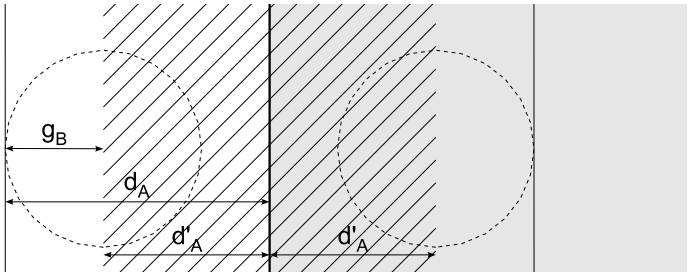


Abbildung 4.6: Toleranz abzüglich der maximalen Abweichung

Je höher die Genauigkeit ist, desto kleiner ist der Abstand $2d_A$ und damit die räumliche Toleranz. Umgekehrt wird die räumliche Toleranz mit geringerer Genauigkeit größer.

2. *Je geringer die Genauigkeit, desto geringer die räumliche Toleranz:* Mit diesem Ansatz werden unterschiedliche Genauigkeiten ausgeglichen.

   Wird von der räumlichen Toleranz d_A die maximale Abweichung g_B einer tatsächlichen Position von der ermittelten subtrahiert und die Differenz als neue räumliche Toleranz d'_A verwendet, so wird genau dies erreicht.

   Gleichzeitig garantiert dieses Vorgehen, dass die Antwort für jedes mobile Objekt korrekt ist, das sich mit einer Wahrscheinlichkeit größer Null außerhalb des durch d_A beschriebenen Toleranzstreifens aufhält. Insbesondere ist die Antwort korrekt, wenn sich das mobile Objekt tatsächlich außerhalb des Toleranzstreifens aufhält. In Abbildung 4.6 ist dies graphisch dargestellt.

4.6 Kombination beider Toleranzen

Besonders wenn die Maximalgeschwindigkeiten der mobilen Objekte stark variieren, kann es sinnvoll sein, zeitliche und räumliche Toleranzen zu kombinieren. Es gibt zwei wichtige Kombinationsmöglichkeiten:

1. *Maximum:* Die Antwort auf eine entsprechend formulierte Anfrage kann auf der Basis von Positionsdaten gebildet werden, die der räumlichen oder der zeitlichen Toleranz genügen.

   Wie oben angedeutet, können zeitliche und räumliche Toleranz die Positionsbestimmungsrate und die -übermittlungsrate begrenzen. Bei mobilen Objekten mit hoher Maximalgeschwindigkeit begrenzt normalerweise die zeitliche Toleranz diese Raten, bei geringer Maximalgeschwindigkeit werden sie durch die die räumliche Toleranz begrenzt.

   Die Maximumbildung eignet sich besonders für Gebiets- und Gebietspositionsanfragen, da mit diesen Anfragetypen gleichzeitig mehrere mobile Objekte mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten angefragt werden können. Für langsame mobile Objekte gilt der Toleranzstreifen der räumlichen Toleranz. Sehr schnelle mobile Objekte müssen wegen der zeitlichen Toleranz trotzdem nicht ständig ihre Position bestimmen.

   Kann ein mobiles Objekt seine Maximalgeschwindigkeit während einer kontinuierlichen Positionsanfrage ändern, so kann die Maximumbildung auch hierbei genutzt werden.

2. *Minimum:* Bei der Minimumbildung muss die Antwort auf Basis von Positionsdaten gebildet werden, die der räumlichen und der zeitlichen Toleranz genügen.

   Variieren die Maximalgeschwindigkeiten der mobilen Objekte bei einer kontinuierlichen Gebiets- oder Gebietspositionsanfrage sehr, so kann sich ein mobiles Objekt mit hoher Maximalgeschwindigkeit bei Angabe einer zeitlichen Toleranz weit vom Rand des angefragten Gebiets entfernen, bevor die Antwort entsprechend angepasst wird. Das gleiche gilt innerhalb des angefragten Gebiets bei einer Gebietspositionsanfrage. Durch die Minimumbildung mit der räumlichen Toleranz kann diese Entfernung begrenzt werden. Insbesondere bei kleinen angefragten Gebieten kann damit verhindert werden, dass sehr schnelle mobile Objekte diese durchqueren ohne je in der Antwort enthalten zu sein.

Bei der Diskussion von Algorithmen zur Anfrageverarbeitung, in den nächsten beiden Kapiteln, werden beide Toleranzen getrennt betrachtet. Da die Toleranzen stets für binäre Entscheidungen – für oder gegen eine neuerliche Positionsübermittlung oder -bestimmung – oder die zeitliche Planung von Positionsbestimmungen verwendet werden, lassen sich Maximum- und Minimumbildung anschließend leicht realisieren.

Binäre Entscheidungen müssen bei Maximumbildung logisch mit Und verknüpft werden und bei Minimumbildung logisch mit Oder. Bei der Planung der nächsten Positionsbestimmung kann direkt das Maximum beziehungsweise Minimum der errechneten Zeitpunkte gebildet werden.

Toleranzen zum Schutz des Energievorrats Die Toleranz hat direkten Einfluss auf den Energieverbrauch eines mobilen Objekts, wenn sie voll ausgenutzt wird. Erlaubt eine diskrete Anfrage nur eine geringe Toleranz, so ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die angefragten mobilen Objekte ihre Position bestimmen und übermitteln müssen. Bei einer kontinuierlichen Anfrage mit geringer Toleranz müssen die angefragten mobilen Objekte ihre Position häufig bestimmen und übermitteln.

Oft haben die Besitzer der mobilen Endgeräte kein Interesse daran, viel Energie für die Beantwortung von Anfragen aufzuwenden, die weder von ihnen noch von ihnen vertrauten Anwendern oder Diensten gestellt wurden. Das gilt insbesondere, wenn Anfragen mit geringer Toleranz dazu missbraucht werden, den Energievorrat „leerzufragen“.

Zum Schutz des Energievorrats und der Privatsphäre eignet sich die Maximumbildung ebenfalls. Jedes mobile Objekt kann eine minimale Toleranz definieren, mit der es bereit ist, Anfragen zu beantworten. Diese Toleranz kann in Abhängigkeit von den anfragenden Benutzern, Geräten oder Diensten gewählt werden. Die mobilen Objekte übermitteln diese „Sicherheitseinstellungen“ bei Änderungen sofort an den Lokationsdienst. Vorteil der sofortigen Übermittlung ist, dass die mobilen Objekte nicht bei jeder Anfrage kontaktiert werden müssen und damit Energie sparen können. Erhält der Lokationsdienst eine Anfrage, so verwendet er das Maximum aus der in der Anfrage erlaubten und der in den Sicherheitseinstellungen angegebenen Toleranz.

Wenn Anfragen in irgendeiner Form im Broadcast vielen mobilen Objekten gleichzeitig mitgeteilt werden, muss jedes mobile Objekt selbst dieses Maximum bilden.

5 Verarbeitung von Positionsanfragen

In diesem Kapitel wird untersucht wie diskrete und kontinuierliche Positionsanfragen entsprechend der erlaubten Toleranzen möglichst energieschonend beantwortet werden können. Zunächst wird die diskrete Variante betrachtet und anschließend die kontinuierliche. In Abschnitt 5.4 wird ein neues Vorgehen zur Minimierung des Energieverbrauchs bei Verwendung des entfernungsbasiert berichtenden Protokolls beziehungsweise eines Koppelnavigationsprotokolls vorgestellt. In Abschnitt 5.6 werden besonders hohe Anfragelasten durch diskrete und kontinuierliche Positionsanfragen untersucht.

Große räumliche Toleranz Erlaubt eine Positionsanfrage eine sehr große räumliche Toleranz d_A, so kann sie durch Angabe der Location Area, in der sich das angefragte mobile Objekt gerade befindet, beantwortet werden. Voraussetzung ist, dass die Location Area vollständig innerhalb des Toleranzkreises liegt. Dies ist der Fall, wenn der Abstand der beiden am weitesten entfernten Randpunkte der Location Area kleiner als $2d_A$ ist. Zur Beantwortung der Anfrage muss das mobile Objekt nicht kontaktiert werden. Es verbraucht keine Energie. Im Folgenden wird dieser Fall nicht weiter betrachtet – es werden stets kleinere räumliche Toleranzen angenommen.

5.1 Diskrete Positionsanfragen

Da eine Positionsanfrage jeweils genau ein mobiles Objekt betrifft, werden die mobilen Objekte individuell betrachtet.

Normalerweise stellt keine Anwendung dicht hintereinander mehrere diskrete Positionsanfragen über dasselbe mobile Objekt. Benötigt eine Anwendung ständig die momentane Position eines mobilen Objekts, so verwendet sie eine kontinuierliche Anfrage. Daher sind diskrete Positionsanfragen über dasselbe mobile Objekt normalerweise unabhängig voneinander.

Zur Minimierung des Energieverbrauchs sollte die Position nur bestimmt werden, wenn eine Anfrage vorliegt. Nur bei hoher Anfragelast ist ein anderes Vorgehen energieschonender. Mehr dazu in Abschnitt 5.6.

Algorithmus Erhält der Lokationsdienst eine diskrete Positionsanfrage, so prüft er zunächst, ob er über zwischengespeicherte Positionsdaten des angefragten mobilen Objekts verfügt, die der geforderten Toleranz genügen. Bei einer zeitlichen Toleranz T_A ist dies der Fall, wenn die Positionsdaten nicht älter als T_A sind. Bei räumlicher Toleranz d_A dürfen sie nicht älter als $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ sein.

Andernfalls fordert der Lokationsdienst das mobile Objekt zu einer Positionsübermittlung auf. In der Aufforderung teilt er die erlaubte Toleranz mit. Wie das mobile Objekt auf die Aufforderung reagiert, hängt von der Art der Toleranz ab:

- *Zeitliche Toleranz* Das mobile Objekt prüft, ob es aktuellere Positionsdaten, als die zuletzt übermittelten, parat hat. Hat es solche und sind sie nicht älter als T_A, so kann es diese sofort übermitteln. Andernfalls muss es seine Position zunächst bestimmen und dann übermitteln.

- *Räumliche Toleranz* Wie bei zeitlicher Toleranz prüft das mobile Objekt, ob es aktuellere Positionsdaten als die zuletzt übermittelten parat hat. Wenn diese nicht älter als $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ sind, so können sie zur Antwort verwendet werden. Andernfalls muss das mobile Objekt seine Position zunächst bestimmen.

  Theoretisch kann auf die Positionsübermittlung verzichtet werden, wenn sich das mobile Objekt momentan noch innerhalb des Toleranzkreises um die zuletzt übermittelte Position aufhält. Der Lokationsdienst kann zur Beantwortung der Anfrage die zuletzt übermittelte Position verwenden. Hat das mobile Objekt seine Position eben bestimmt, so ist dies der Fall, wenn der Abstand $|\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{U,\mathrm{OID}}|$ zwischen der zuletzt bestimmten Position $\vec{P}_{B,\mathrm{OID}}$ und der zuletzt übermittelten Position $\vec{P}_{U,\mathrm{OID}}$ kleiner als d_A ist. Liegt die letzte Positionsbestimmung etwas zurück, so ist dies der Fall, wenn die Positionsdaten nicht älter als

  $$\frac{d_A - |\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{U,\mathrm{OID}}|}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}$$

  sind.

  Allerdings verzögert das Verzichten auf eine Positionsübermittlung die Beantwortung der Anfrage erheblich. Der Lokationsdienst muss zunächst eine gewisse Zeitspanne abwarten, um zu erkennen, dass die Positionsübermittlung ausgeblieben ist. Erst dann kann er die Anfrage mit den zuletzt übermittelten Positionsdaten beantworten. Für viele Anwendungen ist diese Zeitspanne inakzeptabel groß. Normalerweise ist die Position daher in jedem Fall zu übermitteln.

5.2 Kontinuierliche Positionsanfragen

Zur Minimierung des Energieverbrauchs darf bei einer kontinuierlichen Anfrage nur einmal zu einer Positionsübermittlung aufgefordert werden. Anschließend muss das mobile Objekt seine Position selbstständig bestimmen und übermitteln – es wechselt in ein berichtendes Protokoll. Jedes andere Vorgehen würde unnötig Energie für den Empfang von Nachrichten des Lokationsdienstes verbrauchen.

Algorithmus Im ersten Moment erfolgt die Verarbeitung einer kontinuierlichen Positionsanfrage wie bei der diskreten Variante. Hat der Lokationsdienst der Toleranz genügende Positionsdaten parat, so gibt er die initiale Antwort. Anschließend teilt er dem mobilen Objekt die Anfrage mit. Die Mitteilung sollte möglichst knapp, bevor die nächste Positionsbestimmung beziehungsweise -übermittlung erforderlich ist, gesendet werden. Wird die Anfrage zwischendurch zurückgezogen oder die Position wegen einer anderen Anfrage erneut übermittelt, so braucht dem mobilen Objekt die Anfrage gegebenenfalls gar nicht mitgeteilt zu werden.

Hat der Lokationsdienst keine passenden Positionsdaten parat, so übermittelt er die Anfrage sofort an das mobile Objekt. Die initiale Antwort kann erst nach der Positionsübermittlung gegeben werden.

Wie häufig Positionsbestimmung und -übermittlung anschließend erfolgen müssen, hängt von der erlaubten Toleranz ab. Zeitliche und räumliche Toleranz werden in den nächsten beiden Abschnitten separat betrachtet.

5.3 Zeitliche Toleranz bei kontinuierlichen Positionsanfragen

Zur Minimierung des Energieverbrauchs ist die Positionsbestimmungsrate so klein wie möglich zu wählen. Bei zeitlicher Toleranz T_A ist die kleinstmögliche Rate T_A^{-1}. Die Positionsübermittlung erfolgt mit gleicher Rate. Nach Abschnitt 2.7 handelt es sich um das periodisch berichtende Protokoll, allerdings mit angepasster Positionsbestimmungsrate.

Zusätzliche Positionsbestimmung und -übermittlung Verarbeitet das mobile Objekt mehrere Anfragen gleichzeitig oder wurde neben der zeitlichen Toleranz eine räumliche unter Minimumbildung erlaubt, so kann es passieren, dass das mobile Objekt seine Position zusätzlich zur Rate T_A^{-1} bestimmen muss. Folgt der zusätzlichen Positionsbestimmung eine Positionsübermittlung, so kann die nächste Positionsbestimmung und -übermittlung nach der Rate T_A^{-1} entsprechend verzögert werden.

Zusätzliche Positionsbestimmung Folgt der zusätzlichen Positionsbestimmung keine zusätzliche Positionsübermittlung, so ist vor Beginn der nächsten Positionsbestimmung nach der Rate T_A^{-1} eine Entscheidung zu treffen.

Sei die letzte Positionsübermittlung zum Zeitpunkt t_0 erfolgt. Dann muss die nächste zum Zeitpunkt $t_1 = t_0 + T_A$ erfolgen. Sei t_i mit $t_0 < t_i < t_1$ der Zeitpunkt, zu dem die zusätzliche Positionsbestimmung statt gefunden hat. Zum Zeitpunkt $t_1 - T_{B_{min}}$ gibt es nun zwei Möglichkeiten:

1. *Zwischendurch ermittelte Positionsdaten ignorieren:* Das mobile Objekt bestimmt seine Position erneut, was die Zeitspanne $T_{B_{min}}$ in Anspruch nimmt. Zum Zeitpunkt t_1 kann es dann die eben bestimmte Position übermitteln. Die nächste Positionsbestimmung und -übermittlung muss anschließend, wie üblich, nach T_A erfolgen.

2. *Zwischendurch ermittelte Positionsdaten übermitteln:* Das mobile Objekt übermittelt zum Zeitpunkt t_1 die zum Zeitpunkt t_i bestimmten Positionsdaten. Da der Lokationsdienst damit aber um $t_1 - t_i$ veraltete Positionsdaten erhält, muss die nächste Positionsbestimmung und -übermittlung bereits nach der Zeitspanne $T_A - (t_1 - t_i)$ erfolgen.

Welches Vorgehen den Energieverbrauch minimiert, hängt von den Kosten für Positionsbestimmung W_B und Positionsübermittlung W_U ab und von der resultierenden durchschnittlichen Leistungsaufnahme, bis Positionsbestimmung und -übermittlung wieder normal nach der Rate T_A^{-1} erfolgen. Wird die Positionsbestimmung zum Zeitpunkt t_i ignoriert, so gilt für die Leistungsaufnahme:

$$\overline{P}_{\text{OID}} = \frac{W_B + W_U}{T_A}$$

Werden die zum Zeitpunkt t_i bestimmten Positionsdaten zum Zeitpunkt t_1 übermittelt, so gilt:

$$\overline{P}_{\text{OID}} = \frac{W_U}{T_A - (t_1 - t_i)}$$

Neuerliche Positionsbestimmung zum Zeitpunkt t_1 lohnt sich, wenn $t_1 - t_i$ relativ groß ist, das heißt die zusätzliche Positionsbestimmung zum Zeitpunkt t_i relativ knapp nach t_0 erfolgt ist. Exakt, wenn:

$$t_i - t_0 < T_A \left(1 - \frac{W_B}{W_B + W_U}\right)$$

Ansonsten sollte zum Zeitpunkt $t_1 - T_{B_{min}}$ auf neuerliche Positionsbestimmung verzichtet und zum Zeitpunkt t_1 die Positionsdaten von t_i übermittelt werden. So muss vorgegangen werden, wenn der Zeitpunkt t_i so dicht vor t_1 liegt, dass eine erneute Positionsbestimmung nicht möglich ist, das heißt wenn $t_i > t_1 - T_{B_{min}}$.

5.4 Räumliche Toleranz bei kontinuierlichen Positionsanfragen

Bei einer kontinuierlichen Positionsanfrage mit räumlicher Toleranz d_A kann auf Positionsübermittlungen verzichtet werden, so lange sich das mobile Objekt innerhalb des durch d_A definierten Toleranzkreises um die zuletzt übermittelte Position befindet.

Dieses Vorgehen entspricht dem entfernungsbasiert berichtenden Protokoll. Ein Koppelnavigationsprotokoll ist zur Energieschonung noch besser geeignet. Bei diesem liegt der Toleranzkreis nicht um die zuletzt übermittelte, sondern um die vermutete Position. Diese berechnet sich aus einer Vorhersagefunktion.

Der Einfachheit halber wird zunächst beschrieben, wie bei der Verwendung des entfernungsbasiert berichtenden Protokolls die Zahl der Positionsbestimmungen reduziert und der Energieverbrauch insgesamt minimiert werden kann. Anschließend werden die erforderlichen Änderungen für die Koppelnavigationsprotokolle genannt.

Reduzierung der Zahl der Positionsbestimmungen Zur Energieschonung muss die Zahl der Positionsbestimmungen reduziert werden. Die maximal mögliche Zeitspanne zwischen zwei Positionsbestimmungen hängt von der räumlichen Toleranz und dem Abstand des mobilen Objekts von der zuletzt übermittelten Position ab.

Nach einer Positionsübermittlung befindet sich das mobile Objekt zunächst in der Mitte des Toleranzkreises. Es kann den Toleranzkreis frühestens nach der Zeitspanne $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ verlassen. Die nächste Positionsbestimmung muss nach der Zeitspanne $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}} - T_{B_{min}}$ begonnen werden, so dass sie nach $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ abgeschlossen ist.

Anschließend wird der Abstand r des mobilen Objekts vom Rand des Toleranzkreises berechnet. Es gilt:

$$r = d_A - |\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{U,\mathrm{OID}}|$$

$\vec{P}_{B,\mathrm{OID}}$ ist die eben bestimmte Position und $\vec{P}_{U,\mathrm{OID}}$ die zuletzt übermittelte.

Ist $r \geq T_{B_{min}}\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ so kann eine weitere Positionsbestimmung erfolgen, bevor das mobile Objekt den Toleranzkreis verlassen kann. Dieses Vorgehen ist fortzusetzen bis $r < T_{B_{min}}\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ und die Position sofort übermittelt werden muss.

Dieses Vorgehen minimiert die Zahl der Positionsübermittlungen und reduziert außerdem die Zahl der Positionsbestimmungen im Vergleich zum üblichen Vorgehen mit ständiger Positionsbestimmung. Der Energieverbrauch ist kleiner als sonst, aber normalerweise nicht minimal.

Das andere Extrem, die Minimierung der Zahl der Positionsbestimmungen, indem die Position jedes Mal übermittelt wird, wenn sich das mobile Objekt noch so geringfügig von der zuletzt übermittelten Position entfernt hat, minimiert den Energieverbrauch normalerweise erst recht nicht.

Problematisch beim bisher beschriebenen Vorgehen ist, wenn sich das mobile Objekt dicht vor dem Rand des Toleranzkreises befindet. Es muss seine Position sehr häufig bestimmen – im Abstand $T_{B_{min}}\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ vom Rand, dem ungünstigsten Fall, mit der Rate $T_{B_{min}}^{-1}$. Das gilt nicht nur, wenn das mobile Objekt stehen bleibt, sondern auch wenn es sich langsam auf

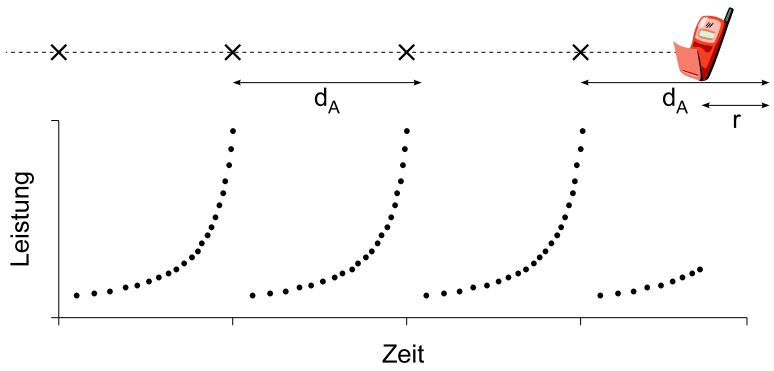


Abbildung 5.1: Positionsbestimmungsrate beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll

den Rand des Toleranzkreises zubewegt. Abbildung 5.1 zeigt wie die Häufigkeit der Positionsbestimmungen und damit die Leistungsaufnahme des mobilen Objekts bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit jeweils vor der Positionsübermittlung anwächst. Der Zeitpunkt, zu dem eine Positionsbestimmung geendet hat, ist als Punkt dargestellt, eine Positionsübermittlung als Kreuz.

Minimierung des Energieverbrauchs Zur Minimierung des Energieverbrauchs ist die Position gegebenenfalls früher als unbedingt erforderlich zu übermitteln. Der Energieverbrauch steigt durch die häufigeren Positionsübermittlungen, sinkt aber gleichzeitig durch die geringere Zahl an Positionsbestimmungen.

Um die nächste Positionsbestimmung planen zu können, muss eine eventuelle Positionsübermittlung immer direkt nach einer Positionsbestimmung erfolgen. Nach jeder Positionsbestimmung kann neu entschieden werden, ob die Position sofort übermittelt und die nächste Positionsbestimmung erst nach der Zeitspanne $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}} - T_{B_{min}}$ begonnen wird, oder ob die Position nicht übermittelt und die nächste Positionsbestimmung nach der Zeitspanne

$$\frac{d_A - |\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{U,\mathrm{OID}}|}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} - T_{B_{min}}$$

begonnen wird.

Welche der beiden Vorgehensweisen in einer konkreten Situation energieschonender ist, hängt davon ab, wie sich das mobile Objekt in der nächsten Zeit bewegt, wie viel Energie eine Positionsbestimmung und wie viel Energie eine Positionsübermittlung verbraucht. Die künftige Bewegung kann an Hand älterer Positionsdaten vermutet werden.

Zur Minimierung des Energieverbrauchs müssen beide Möglichkeiten – sofortige oder spätere Positionsübermittlung – simuliert und die durchschnittlichen Leistungsaufnahmen berechnet werden. Dazu simuliert das mobile Objekt iterativ die nächsten Positionsbestimmungen entsprechend der vermuteten Bewegung und berechnet nach jeder simulierten Positionsbestimmung die Leistungsaufnahme unter beiden Möglichkeiten. Die Leistungsaufnahme ergibt sich aus der Zahl der Positionsbestimmungen, der Zahl der Positionsübermittlungen und der betrachteten Zeitspanne. Zum Vergleich der Leistungsaufnahmen reichen relative Werte aus dem Energiekostenverhältnis W_U/W_B. Dabei ist W_U der Energieverbrauch für eine Positionsübermittlung und W_B der für eine Positionsbestimmung.

Im Folgenden werden zwei häufige Bewegungsmuster analysiert und wird ermittelt, wie bei diesen der Energieverbrauch minimiert werden kann. In Abschnitt 7.4 werden sie später in Simulationen miteinander verglichen.

Bewegung aus dem Toleranzkreis Als vermutete Bewegung wird angenommen, dass sich das mobile Objekt von der zuletzt übermittelten Position immer weiter entfernt. Der Abstand zwischen dem Rand des Toleranzkreises und der momentanen Position wird immer kleiner. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme für Positionsbestimmungen nimmt bis zur nächsten Positionsübermittlung immer weiter zu. Unter dieser Annahme braucht nur die Zeitspanne bis zur nächsten Positionsbestimmung betrachtet zu werden. Nach einer Positionsbestimmung berechnet sich die Leistungsaufnahme für die beiden Möglichkeiten wie folgt:

1. *Sofortige Positionsübermittlung:* Die Zeitspanne bis zum Ende der nächsten Positionsbestimmung beträgt $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$. Die Energiekosten setzen sich aus einer Positionsbestimmung und einer Positionsübermittlung zusammen und betragen $W_U + W_B$. Als Leistungsaufnahme ergibt sich:

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}} = \frac{W_U + W_B}{\frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}} = \hat{v}_{\mathrm{OID}} \frac{W_U + W_B}{d_A}$$

2. *Spätere Positionsübermittlung:* Die Zeitspanne bis zum Ende der nächsten Positionsbestimmung beträgt

$$\frac{d_A - |\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{U,\mathrm{OID}}|}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} = \frac{r}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}$$

   und hängt von r ab, der Entfernung der momentanen Position vom Rand des Toleranzkreises. Als Leistungsaufnahme ergibt sich

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}} = \frac{W_B}{\frac{r}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}} = \hat{v}_{\mathrm{OID}} \frac{W_B}{r}$$

Sofortige Positionsübermittlung ist energieschonender, wenn

$$\hat{v}_{\mathrm{OID}} \frac{W_U + W_B}{d_A} < \hat{v}_{\mathrm{OID}} \frac{W_B}{r}$$

das heißt, wenn der Abstand r des mobilen Objekts vom Rand des Toleranzkreises kleiner als

$$d_A \frac{W_B}{W_U + W_B} = \frac{d_A}{\frac{W_U}{W_B} + 1}$$

ist. Dadurch entsteht ein Kreisring innerhalb des Toleranzkreises, wie in Abbildung 5.2 dargestellt. Stellt ein mobiles Objekt nach einer Positionsbestimmung fest, dass es sich innerhalb des Kreisrings befindet, so sollte es seine Position übermitteln.

Wie oben beschrieben, muss die Position auf jeden Fall übermittelt werden, wenn der Abstand zum Rand des Toleranzkreises kleiner als $T_{B_{min}} \hat{v}_{\mathrm{OID}}$ ist.

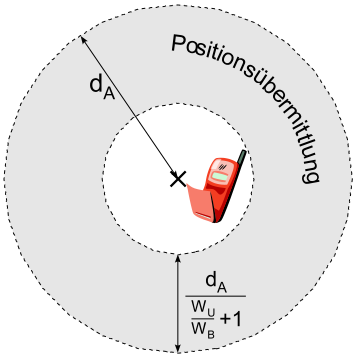


Abbildung 5.2: Kreisring, in dem Positionsübermittlung erfolgen sollte

Geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit Beim eben vorgestellten Vorgehen werden immer nur zwei Positionsbestimmungen und unterschiedliche Zeitspannen betrachtet. Vor allem bei kleinen Geschwindigkeiten gegenüber der Maximalgeschwindigkeit ist dieses Vorgehen unzureichend. Bleibt ein mobiles Objekt vor Betreten des eben beschriebenen Kreisrings stehen, so wird die Position nicht übermittelt. Wenn ein mobiles Objekt abseits der zuletzt übermittelten Position stehen bleibt, sollte die Position aber noch einmal übermittelt werden, damit die Positionsbestimmungsrate vorerst so gering wie möglich, $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/d_A$, gewählt werden kann.

Auch bei sehr langsamer, geradliniger Bewegung sollte die Position früher als oben beschrieben übermittelt werden, damit die Positionsbestimmungsrate wieder klein gewählt werden kann. Oft bewegt sich ein mobiles Objekt innerhalb des Toleranzkreises bis zur nächsten Positionsübermittlung geradlinig und mit konstanter Geschwindigkeit. Je kleiner die räumliche Toleranz, desto häufiger gilt diese Annahme.

Im Folgenden wird ein Vorgehen entwickelt, das die durchschnittliche Leistungsaufnahme bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit nachgewiesen minimiert.

Sei t_0 der Zeitpunkt der letzten Positionsübermittlung. Die nächste Positionsbestimmung endet zum Zeitpunkt $t_1 = t_0 + T_{0,1}$. Für $T_{0,1}$ gilt:

$$T_{0,1} = \frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} = \frac{r_0}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}$$

Da $v < \hat{v}_{\mathrm{OID}}$ hat sich das mobile Objekt zum Zeitpunkt t_1 erst um die Distanz $vT_{0,1}$ von der zuletzt übermittelten Position entfernt. Eine Positionsübermittlung sei noch nicht nötig. Es gilt:

$$r_1 = d_A - vT_{0,1}$$

Allgemein folgt:

$$T_{i-1,i} = \frac{r_{i-1}}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} \text{ und } r_i = d_A - vT_{0,i}$$

Für die Zeitspanne $T_{0,i}$ zwischen der letzten Positionsübermittlung und der anschließend i-ten Positionsbestimmung gilt:

$$T_{0,i} = \frac{d_A}{v}\left(1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^i\right)$$

Der Rechenweg wird in Anhang A.1 gezeigt.

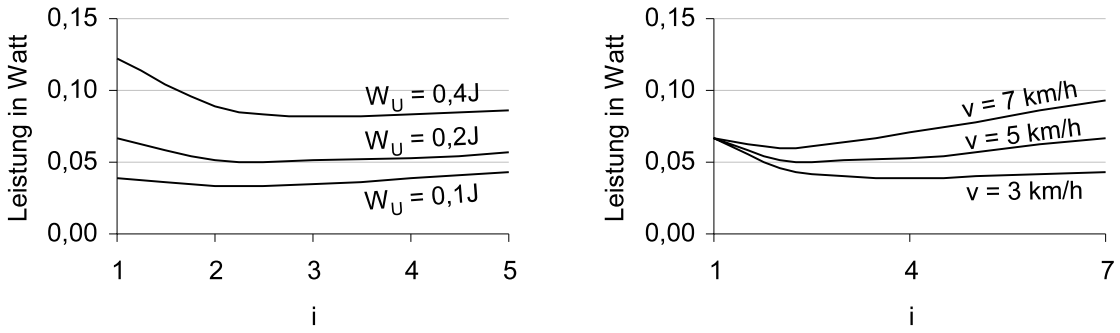


Abbildung 5.3: Leistungsaufnahme beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll

Übermittelt ein mobiles Objekt seine Position immer nach i Positionsbestimmungen, so gilt bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit für die durchschnittliche Leistungsaufnahme:

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}}(i) = \frac{iW_B + W_U}{T_{0,i}} = \frac{v}{d_A} \cdot \frac{iW_B + W_U}{1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^i}$$

Beim ursprünglichen Vorgehen mit minimaler Zahl an Positionsübermittlungen wird $i = i_{\max}$ verwendet. Für $i_{\max}$ gilt:

$$T_{0,i_{\max}-1} \leq \frac{d_A}{v} - T_{B_{min}} < T_{0,i_{\max}}$$

Gesucht wird i' mit $1 \leq i' \leq i_{\max}$ so dass,

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}}(i') = \frac{i'W_B + W_U}{T_{0,i'}} = \frac{v}{d_A} \cdot \frac{i'W_B + W_U}{1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^{i'}}$$

minimal ist. Auf die explizite Berechnung von i' wird hier verzichtet. Ein Rechner kann i' schnell ermitteln. Ergibt sich für i' ein Wert kleiner $i_{\max}$, so sollte die nächste Positionsübermittlung früher als üblich, bereits nach der i'-ten Positionsbestimmung, erfolgen. Zur Berechnung von i' müssen W_B und W_U nicht direkt bekannt sein. Zum Vergleich der Leistungsaufnahme bei verschiedenen Werten für i reicht das Energiekostenverhältnis W_U/W_B.

Abbildung 5.3 zeigt zwei Diagramme, mit denen obiger Term für die Durchschnittleistung $\overline{P}_{\mathrm{OID}}(i)$ genauer analysiert wurde. Es ist $W_U = 0{,}2\,\mathrm{J}$ falls nicht anders angegeben und $W_B = 0{,}04\,\mathrm{J}$. Das heißt, normalerweise ist $W_U/W_B = 5$. Ferner ist $\hat{v}_{\mathrm{OID}} = 2{,}78\,\mathrm{m/s} = 10\,\mathrm{km/h}$, $d_A = 10\,\mathrm{m}$ und $v = 1{,}39\,\mathrm{m/s} = 5\,\mathrm{km/h}$ falls nicht anders angegeben.

Im linken Diagramm wurde der Energieverbrauch für eine Positionsübermittlung variiert. Je größer W_U, desto größer ist i' bei dem $\overline{P}_{\mathrm{OID}}$ minimal ist. Bei $W_U = 0{,}2\,\mathrm{J}$ und $W_U = 0{,}4\,\mathrm{J}$ sollte die Positionsübermittlung nach der dritten Positionsbestimmung erfolgen, bei $W_U = 0{,}1\,\mathrm{J}$ bereits nach der zweiten.

Im rechten Diagramm wurde die tatsächliche Geschwindigkeit v variiert. Je höher die Geschwindigkeit, desto früher sollte und muss die Position übermittelt werden. Bei $T_{B_{min}} = 0{,}5\,\mathrm{s}$ und $v = 1{,}94\,\mathrm{m/s} = 7\,\mathrm{km/h}$ bereits nach $i_{\max} = 2$ Positionsbestimmungen, unabhängig vom Energieverbrauch. Wie das Diagramm zeigt, deckt sich dies bei dem gegebenen Verhältnis der Energiekosten mit dem gesuchten i' zur Minimierung der Leistungsaufnahme. Bei $v = 0{,}83\,\mathrm{m/s} = 3\,\mathrm{km/h}$ wäre eine Positionsübermittlung bei $T_{B_{min}} = 0{,}5\,\mathrm{s}$ eigentlich erst

nach $i_{\max} = 6$ Positionsbestimmungen erforderlich. Zur Minimierung der Leistungsaufnahme sollte sie bereits nach jeweils $i' = 4$ Positionsbestimmungen erfolgen.

In der Realität kann i' nicht direkt verwendet werden. Geradlinige Bewegung und konstante Geschwindigkeit sind Modellannahmen, die in der Realität nur selten exakt auftreten. Damit das Vorgehen den Energieverbrauch auch bei Geschwindigkeitsänderungen oder starken Kurven reduziert, muss aus i' eine Entfernung zum Rand des Toleranzkreises berechnet werden, bei deren Unterschreitung ein mobiles Objekt seine Position übermitteln sollte.

Bei der Berechnung von i' besteht bei diesem Vorgehen kein Grund, sich auf Ganzzahlen zu beschränken. i' sollte so berechnet werden, dass $\overline{P}_{\mathrm{OID}}(i')$ wirklich minimal ist. Die gesuchte Entfernung $r_{i'}$ zum Rand des Toleranzkreises, bei der ein mobiles Objekt seine Position übermitteln sollte, ergibt sich zu

$$r_{i'} = d_A - vT_{0,i'}$$

Das heißt, ein mobiles Objekt sollte seine Position übermitteln, sobald es sich um $vT_{0,i'}$ von der zuletzt übermittelten Position entfernt hat. Übermittelt es seine Position früher, so ist der Energieverbrauch höher. Übermittelt es seine Position erst wenn es sich näher am Rand des Toleranzkreises befindet, so ist der Energieverbrauch ebenfall höher. Um im Durchschnitt die Position im Abstand $r_{i'}$ vom Rand des Toleranzkreises zu übermitteln, muss ein mobiles Objekt seine Position bei Unterschreiten der Entfernung

$$r_{i'-0,5} = d_A - vT_{0,i'-0,5}$$

übermitteln. Würde die Position erst bei Unterschreiten der Entfernung $r_{i'}$ übermittelt, so würde sie durchschnittlich in der Entfernung $r_{i'+0,5}$ übermittelt. Der Energieverbrauch wäre höher.

Dadurch entsteht, wie vorher, ein Kreisring, innerhalb dessen ein mobiles Objekt seine Position übermitteln sollte. Er hat die Breite $r_{i-0,5}$, die von der Geschwindigkeit v abhängt. Damit sich das Vorgehen auf Beschleunigen oder Verzögern rasch einstellt, sollte für v die momentane Geschwindigkeit verwendet werden. Das heißt, $r_{i-0,5}$ muss nach jeder Positionsbestimmung neu berechnet werden. Wird bei der Positionsbestimmung die Momentangeschwindigkeit nicht ermittelt, so kann sie aus den beiden letzten Positionsbestimmungen abgeschätzt werden. Insbesondere bei Stillstand sollte die Position möglichst rasch übermittelt werden, damit die Positionsbestimmungsrate auf den niedrigsten möglichen Wert $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/d_A$ eingestellt werden kann.

Abbildung 5.4 zeigt den Kreisring und dazu in einem Diagramm r_i und $r_{i-0,5}$ in Abhängigkeit von v. Die für das Diagramm verwendeten Parameter sind $\hat{v}_{\mathrm{OID}} = 2{,}78\,\mathrm{m/s} = 10\,\mathrm{km/h}$, $d_A = 10\,\mathrm{m}$ und $W_U/W_B = 5$.

Das Diagramm zeigt, dass $r_{i'-0,5}$ für $v \approx \hat{v}_{\mathrm{OID}}$ plötzlich stark anwächst. Grund dafür ist die ungewöhnliche Potenz $0^{i'-0,5}$ für $v = \hat{v}_{\mathrm{OID}}$, die bei der Berechnung von $r_{i'-0,5}$ auftritt. Das Anwachsen von $r_{i'-0,5}$ ist in aller Regel belanglos, da die Geschwindigkeit in diesem Bereich sehr hoch ist und nach jeder Positionsbestimmung sowieso eine Positionsübermittlung folgen sollte.

Sehr dicht vor dem Rand des Toleranzkreises muss die Position immer übermittelt werden, wie oben beschrieben.

Probeweise wurde $r_{i'-0,5}$ ab dessen ursprünglichen Tiefpunkt abgeändert und, wie durch die gestrichelten Linien in Abbildung 5.4 angedeutet, fortgesetzt. Die Leistungsaufnahme ist bei Verwendung dieser beiden Fortsetzungen und hohen Geschwindigkeiten nur unmerklich geringer. Bei einem sehr kleinen Energiekostenverhältnis W_U/W_B ist die Leistungsaufnahme im Gegenzug teilweise deutlich höher. $r_{i'-0,5}$ sollte daher wie angegeben verwendet werden.

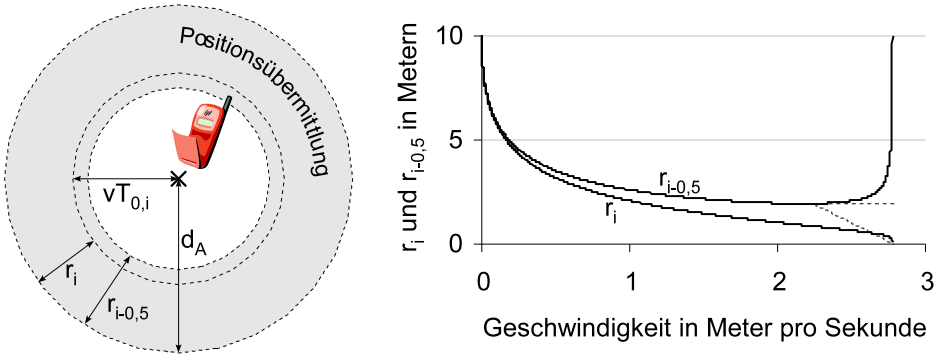


Abbildung 5.4: $r_{i'}$ und $r_{i'-0,5}$ in Abhängigkeit von v

Koppelnavigation Beim Koppelnavigationsprotokoll liegt der Toleranzkreis konzentrisch um die von der Vorhersagefunktion vermuteten Position und bewegt sich mit dieser.

Bei der Berechnung des Beginns der nächsten Positionsbestimmung muss neben der Maximalgeschwindigkeit des mobilen Objekts auch die vermutete Geschwindigkeit der Vorhersage berücksichtigt werden. Im ungünstigsten Fall bewegt sich das mobile Objekt mit Maximalgeschwindigkeit in die entgegengesetzte Richtung der vermuteten Bewegung. Für die Zeitspanne T nach einer Positionsbestimmung mit eventueller Positionsübermittlung bis zum Beginn der nächsten Positionsbestimmung gilt:

$$T = \frac{d_A - |\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{V,\mathrm{OID}}|}{\hat{v}_{\mathrm{OID}} + \overline{v}_K} - T_{B_{min}}$$

Dabei ist $|\vec{P}_{B,\mathrm{OID}} - \vec{P}_{V,\mathrm{OID}}|$ der Abstand zwischen der eben bestimmten Position $\vec{P}_{B,\mathrm{OID}}$ und der von der Vorhersagefunktion vermutete Position $\vec{P}_{V,\mathrm{OID}}$ und $\overline{v}_K$ die Durchschnittsgeschwindigkeit der vorhergesagten Bewegung in der nächsten Zeitspanne $T + T_{B_{min}}$.

Ist die vorhergesagte Geschwindigkeit nicht konstant, so ist T nur implizit gegeben, da T von $\overline{v}_K$ und $\overline{v}_K$ von T abhängt. In diesem Fall muss T iterativ angenähert werden. Alternativ kann für $\overline{v}_K$ eine obere Abschätzung verwendet werden, zum Beispiel die vermutete maximale Geschwindigkeit. Dann kann T wie bei konstanter Geschwindigkeit direkt nach obiger Formel berechnet werden.

Beim zuletzt vorgestellten Vorgehen zur Minimierung des Energieverbrauchs bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit kann die vermutete Geschwindigkeit berücksichtigt werden oder nicht. Entweder wird für v die relative Geschwindigkeit zur vermuteten Position verwendet oder die tatsächliche, absolute Geschwindigkeit, wie oben beschrieben. Wird die relative Geschwindigkeit verwendet, so ist statt $\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ die Summe $\hat{v}_{\mathrm{OID}} + \overline{v}_K$ zu verwenden. Für beide Vorgehensweisen sprechen plausible Argumente.

1. *Relative Geschwindigkeit:* Auch bei hoher absoluter Geschwindigkeit kann sich das mobile Objekt relativ langsam von der vermuteten Position entfernen. Wird die hohe absolute Geschwindigkeit zur Berechnung von $r_{i'-0,5}$ verwendet, so ist die Breite des Kreisrings gering und die Position wird erst nah am Rand des Toleranzkreises übermittelt – die Positionsbestimmungsrate war zuvor unerwünscht hoch.

   Wird die relative Geschwindigkeit zur Berechnung von $r_{i'-0,5}$ verwendet, so ist die Breite des Kreisrings größer und die Positionsübermittlung erfolgt früher, wie erwünscht.

2. *Absolute Geschwindigkeit:* Bewegt sich das mobile Objekt mit der vermuteten Geschwindigkeit, so ist die relative Geschwindigkeit sehr klein – eventuell sogar null. Folglich ist $r_{i'-0,5} \approx d_A$. Selbst bei minimalen Abweichungen von der vermuteten Bewegung wird die Position sofort übermittelt.

   Dieses Verhalten ist normalerweise unerwünscht und tritt bei Verwendung der absoluten Geschwindigkeit nicht auf.

Simulationen in Abschnitt 7.4 zeigen, dass bei linearer Vorhersagefunktion die absolute Geschwindigkeit verwendet werden sollte.

5.5 Vergleich der Toleranzen bei kontinuierlichen Positionsanfragen

Offensichtlich bestehen bei kontinuierlichen Positionsanfragen, die eine räumliche Toleranz erlauben, deutlich mehr Möglichkeiten zur Reduzierung des Energieverbrauchs als bei solchen, die eine zeitliche Toleranz erlauben. Grund dafür ist, dass bei zeitlicher Toleranz die Positionsübermittlungsrate konstant und unabhängig von der tatsächlichen Bewegung ist.

Das gilt allgemein, wenn mobile Objekte getrackt werden. Da durch eine zeitliche Toleranz T_A automatisch eine räumliche Toleranz $d_A = \hat{v}_{\mathrm{OID}} T_A$ gegeben ist, sollte räumliche Toleranz bei kontinuierlichen Positionsanfragen und jeglicher Anfrageverarbeitung, die auf Tracking basiert, zeitlicher bevorzugt werden.

Diese Erkenntnis ist nicht neu. In [Leo 2003, Abschnitte 6.2.2 und 6.4] wird sie – ohne den Begriff Toleranz – bereits beim Vergleich der Zahl der Positionsübermittlungen beim periodisch berichtenden Protokoll mit der beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll genannt.

Es gibt aber Ausnahmen, da zeitliche Toleranz T_A mehr bietet als eine räumliche Toleranz $d_A = \hat{v}_{\mathrm{OID}} T_A$. Letztere garantiert keine regelmäßigen Positionsübermittlungen und berücksichtigt nicht, wenn eine anfragende Anwendung die Positionsdaten der Antwort nicht ständig sondern nur periodisch verarbeitet. Ein Kartendienst beispielsweise, der periodisch die Position eines mobilen Objekts mit der Genauigkeit des Positionsbestimmungssystems, das heißt sehr geringer räumlicher Toleranz, in einer hochauflösenden Karte einzeichnen möchte, ist auf regelmäßige Positionsübermittlungen angewiesen. In diesem Zusammenhang sollte eine zeitliche Toleranz verwendet werden. Die ständige Verwendung einer geringen räumlichen Toleranz würde mehr Energie verbrauchen.

Zeitliche Toleranz ist räumlicher Toleranz immer vorzuziehen, wenn die Positionsdaten relativ selten, aber trotzdem regelmäßig und mit geringer räumlicher Toleranz benötigt werden. Wann konkret eine zeitliche Toleranz statt einer räumlichen verwendet werden sollte, hängt vom Verhältnis der Energiekosten für Positionsübermittlung zu Positionsbestimmung ab. Verbraucht eine Positionsübermittlung nur wenig Energie, so folgt bei räumlicher Toleranz, zur Minimierung des Energieverbrauchs, fast jeder Positionsbestimmung eine Positionsübermittlung, wie beim periodisch berichtenden Protokoll und damit wie bei zeitlicher Toleranz.

Verarbeitet die anfragende Anwendung die Positionsdaten ständig und nicht periodisch, so ist räumliche Toleranz der zeitlichen beim Tracking mobiler Objekte in jedem Fall vorzuziehen.

Verbindungsabbrüche und andere Fehlerfälle Unter Minimumbildung mit der räumlichen Toleranz, kann der Lokationsdienst eine große zeitliche Toleranz dazu verwenden, Verbindungsabbrüche festzustellen. Da zeitliche Toleranz eine Positionsübermittlung binnen der

Zeitspanne T_A garantiert, liegt ein Fehlerfall vor, sobald diese Zeitspanne ohne Positionsübermittlung verstrichen ist.

Der Lokationsdienst kann anschließend mit einem Diagnoseprogramm feststellen, ob die Verbindung abgebrochen ist oder lediglich beim mobilen Endgerät ein Fehler in dem Prozess aufgetreten ist, der die kontinuierliche Positionsanfrage bisher verarbeitet hat.

In letzterem Fall kann dieser wieder aufgesetzt und die Anfrage weiterverarbeitet werden, sobald sie dem mobilen Objekt erneut mitgeteilt wurde.

5.6 Hohe Anfragelast

Werden über ein mobiles Objekt häufig diskrete Positionsanfragen gestellt, so muss es seine Position oft bestimmen, fast wie bei einer kontinuierlichen Positionsanfrage. Zusätzlich verbraucht es aber ständig Energie für den Empfang der Aufforderungen zur Positionsübermittlung. In diesem Fall kann es für das mobile Objekt energieschonender sein, seine Position auch ohne Aufforderung zu bestimmen und zu übermitteln, so dass der Lokationsdienst die Anfragen ohne Aufforderung zur Positionsübermittlung beantworten kann.

Der Wechsel in ein berichtendes Protokoll erfolgt automatisch, wenn der Lokationsdienst die vielen diskreten Positionsanfragen dem mobilen Objekt als eine kontinuierliche Positionsanfrage darstellt.

Ab welcher Anfragelast ein berichtendes Protokoll energieschonender ist, hängt von mehreren Faktoren ab: Durch den Wechsel in ein berichtendes Protokoll spart das mobile Objekt Energie, da es vorerst keine Aufforderungen mehr empfangen muss. Im Gegenzug verbraucht es mehr Energie für Positionsbestimmungen, da es seine Position auch dann bestimmt, wenn momentan keine diskrete Anfrage vorliegt, die es betrifft. Bei räumlicher Toleranz kann das mobile Objekt durch Verwendung des entfernungsbasiert berichtenden Protokolls oder eines Koppelnavigationsprotokolls Positionsübermittlungen – und damit Energie – sparen. Bei zeitlicher Toleranz übermittelt es seine Position auch dann, wenn momentan keine diskrete Anfrage vorliegt, und verbraucht damit mehr Energie. Trotzdem lohnt sich auch bei zeitlicher Toleranz, ab einer gewissen Anfragelast, der Wechsel in das periodisch berichtende Protokoll.

Wie in Abschnitt 5.4 zu sehen, ist die Berechnung der Leistungsaufnahme beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll beziehungsweise bei einem Koppelnavigationsprotokoll deutlich aufwändiger als beim periodisch berichtenden Protokoll. Im Folgenden wird daher exemplarisch die zeitliche Toleranz betrachtet.

Die Berechnung der Anfragelast, ab der in das periodisch berichtende Protokoll gewechselt werden sollte, erfolgt unter der Annahme, dass alle diskreten Positionsanfragen dieselbe zeitliche Toleranz T_A erlauben.

1. *Einzeln Auffordern:* Der Energieverbrauch je Aufforderung beträgt:

$$W_A + W_B + W_U$$

   W_A ist der Energieverbrauch für den Empfang der Aufforderung, W_B für die Positionsbestimmung und W_U für die Positionsübermittlung. Es wird davon ausgegangen, dass keine Anfragen anderen Typs vorliegen und die Position daher bei jeder Aufforderung bestimmt wird.

   Da die Anfragen normalerweise unabhängig voneinander gestellt werden, kann ihre Ankunft als Poisson-Prozess modelliert werden. Erreichen die Anfragen den Lokationsdienst mit einer durchschnittlichen Zwischenankunftszeit T_Z, so wird das mobile Objekt

durchschnittlich mit der Rate

$$\frac{1}{T_A + T_Z}$$

zu Positionsübermittlungen aufgefordert. Wie sich diese Rate errechnet, wird in Anhang A.2 erläutert. Für die durchschnittliche Leistungsaufnahme des mobilen Objekts gilt:

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}} = \frac{W_A + W_B + W_U}{T_A + T_Z}$$

2. *Periodisch berichtendes Protokoll:* Damit der Lokationsdienst stets passende Positionsdaten parat hat, muss das mobile Objekt seine Position mit der Rate T_A^{-1} bestimmen und übermitteln. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme beträgt:

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}} = \frac{W_B + W_U}{T_A}$$

Aus den beiden durchschnittlichen Leistungsaufnahmen wird die Anfragelast T_Z^{-1} bestimmt, ab der ein berichtendes Protokoll energieschonender ist. Dies ist der Fall wenn:

$$\frac{1}{T_Z} > \frac{W_B + W_U}{W_A T_A}$$

Der Rechenweg findet sich in Anhang A.2.

Ein Zahlenbeispiel mit $W_B = 0{,}04\,\mathrm{J}$, $W_U = 0{,}2\,\mathrm{J}$, $W_A = 0{,}1\,\mathrm{J}$ und $T_A = 10\,\mathrm{s}$ zeigt, dass die Zwischenankunftszeit im Vergleich zur zeitlichen Toleranz relativ klein sein muss, damit sich der Wechsel in das periodisch berichtende Protokoll lohnt. Bei den gegebenen Werten mehr als halb so klein, rund 4,17 s. Das heißt, die Ankunftsrate sollte größer als $0{,}24\,\mathrm{s}^{-1}$ sein.

Für unterschiedliche zeitliche Toleranzen eignet sich ein kombiniertes Protokoll. Die Toleranz des berichtenden Protokolls wird so eingestellt, dass die meisten Anfragen ohne zusätzliche Positionsbestimmung und -übermittlung beantwortet werden können. Nur bei einer Anfrage mit geringerer Toleranz kann eine Aufforderung benötigt werden.

Hohe kontinuierliche Anfragelast Eine hohe kontinuierliche Anfragelast entsteht, wenn ein mobiles Objekt von vielen Seiten gleichzeitig angefragt wird. Die Last ist besonders hoch, wenn ständig neue kontinuierliche Anfragen hinzukommen und andere wegfallen.

Für den Energieverbrauch ist dies unproblematisch, da dies fast nur den Lokationsdienst betrifft. Sind dem mobilen Objekt die minimal geforderten Toleranzen einmal bekannt, so muss es über neue kontinuierliche Positionsanfragen und das Zurückziehen solcher nicht informiert werden, wie oben beschrieben.

6 Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen

In diesem Kapitel wird untersucht, wie Gebiets- und Gebietspositionsanfragen energieschonend verarbeitet und beantwortet werden können. Dazu wird zunächst betrachtet, wie viele Positionsbestimmungen und -übermittlungen minimal benötigt werden. Da dieses Minimum voraussetzt, dass die mobilen Objekte vollständig über alle Anfragen informiert sind, ist es nicht unbedingt zur Minimierung des Energieverbrauchs geeignet. In Abschnitt 6.3 wird allgemein untersucht, wie die mobilen Objekte in geeigneter Form über die Gebiets- und Gebietspositionsanfragen in ihrer Nähe informiert werden können, so dass sie nicht übermäßig viele Nachrichten vom Lokationsdienst empfangen müssen und die Zahl der erforderlichen Positionsbestimmung und -übermittlungen trotzdem relativ gering ist. Anschließend werden vier konkrete Ansätze zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen vorgestellt und diskutiert. In Abschnitt 6.8 werden die vier Verfahren tabellarisch verglichen.

Große räumliche Toleranz Wie Positionsanfragen lassen sich auch Gebiets- und Gebietspositionsanfragen bei sehr großer räumlicher Toleranz vollständig an Hand der Location Areas beantworten, in denen sich die mobilen Objekte aufhalten. Dieser Fall wird nicht weiter betrachtet.

6.1 Minimale Zahl an Positionsbestimmungen

Zur Beantwortung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen können häufig ältere Positionsdaten verwendet werden. Bestimmt ein mobiles Objekt seine Position nur, wenn ältere Positionsdaten nicht ausreichen, so ist die Zahl der Positionsbestimmungen minimal.

Zunächst wird an Hand einer Gebietsanfrage gezeigt, wann eine neuerliche Positionsbestimmung unvermeidbar ist und wann darauf verzichtet werden kann.

Der Lokationsdienst kann jederzeit beim Mobilkommunikationssystem erfragen, in welcher Location Area sich ein mobiles Objekt gerade befindet. Schneidet der Rand des angefragten Gebiets die Location Area des mobilen Objekts nicht, so kann sofort entschieden werden, ob sich das mobile Objekt inner- oder außerhalb des angefragten Gebiets aufhält.

Nicht nur die Location Areas, sondern auch die einzelnen Funkzellen können dazu genutzt werden, die Zahl der Positionsbestimmungen auf das Nötigste zu begrenzen. Werden mobile Objekte in Funkzellen außerhalb des angefragten Gebiets nicht über die Anfrage informiert, so brauchen sie ihre Position nicht zu bestimmen.

Am wichtigsten aber ist die Verwendung des momentan möglichen Aufenthaltsbereichs eines mobilen Objekts. Liegt dieser vollständig außerhalb des angefragten Gebiets, so gehört das mobile Objekt nicht zur Antwort. Liegt er vollständig innerhalb, so gehört das mobile Objekt zur Antwort. Einer der beiden Fälle tritt genau dann ein, wenn die Positionsdaten nicht älter als

$$\frac{|\vec{P}_{\mathrm{OID}} - G_A|}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}$$

sind. Dabei ist $|\vec{P}_{\mathrm{OID}} - G_A|$ der Abstand der in den Positionsdaten $\vec{P}_{\mathrm{OID}}$ angegebenen Position vom Rand des angefragten Gebiets G_A.

Eine Positionsbestimmung ist nur erforderlich, wenn die zuletzt bestimmen Positionsdaten älter sind, als die mit obiger Formel berechnete Zeitspanne. Je geringer der Abstand, desto aktueller müssen die Positionsdaten sein, um für die Beantwortung der Gebietsanfrage auszureichen.

Zeitliche Toleranz Erlaubt die Gebietsanfrage eine zeitliche Toleranz T_A, so dürfen in der Antwort mobile Objekte genannt werden, die das angefragte Gebiet binnen der letzten Zeitspanne T_A verlassen haben. Umgekehrt dürfen in der Antwort mobile Objekt verschwiegen werden, die das angefragte Gebiet in der letzten Zeitspanne T_A betreten haben.

Sei t die aktuelle Zeit. Auf neuerliche Positionsbestimmung kann verzichtet werden, wenn der mögliche Aufenthaltsbereich zum Zeitpunkt $t - T_A$ vollständig außerhalb oder vollständig innerhalb des angefragten Gebiets lag, oder wenn zwischendurch eine Positionsbestimmung vorgenommen wurde. In diesen drei Fällen darf die Gebietsanfrage an Hand der vorhandenen Positionsdaten beantwortet werden. Einer der drei Fälle tritt genau dann ein, wenn die vorhandenen Positionsdaten nicht älter als

$$\frac{|\vec{P}_{\mathrm{OID}} - G_A|}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} + T_A$$

sind.

Bei einer kontinuierlichen Gebietsanfrage ist die Positionsbestimmungsrate bei diesem Vorgehen stets kleiner oder gleich T_A^{-1}.

Räumliche Toleranz Erlaubt die Gebietsanfrage eine räumliche Toleranz d_A, so dürfen in der Antwort mobile Objekte genannt werden, die sich zwar außerhalb des angefragten Gebiets, aber auf dem durch räumliche Toleranz definierten Toleranzstreifen aufhalten, der in der Breite $2d_A$ um den Rand des angefragten Gebiets liegt. Umgekehrt dürfen mobile Objekte in der Antwort verschwiegen werden, die sich innerhalb des angefragten Gebiets auf dem Toleranzstreifen befinden.

Auf neuerliche Positionsbestimmung kann verzichtet werden, wenn der momentan mögliche Aufenthaltsbereich eines mobilen Objekts außerhalb angefragten Gebiets liegt und nicht weiter als d_A in dieses hineinragt, oder wenn er innerhalb des angefragten Gebiets liegt und nicht weiter als d_A aus diesem herausragt. Einer dieser beiden Fälle tritt genau dann ein, wenn die vorhandenen Positionsdaten nicht älter als

$$\frac{|\vec{P}_{\mathrm{OID}} - G_A| + d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}$$

sind. Ähnlich wie bei zeitlicher Toleranz reichen Positionsdaten, die nicht älter als $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ sind, auf jeden Fall aus.

Bei einer kontinuierlichen Gebietsanfrage ist die Positionsbestimmungsrate dadurch stets kleiner oder gleich $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/d_A$.

Abbildung 6.1 zeigt vier mobile Objekte und die dem Lokationsdienst bekannten kreisförmigen möglichen Aufenthaltsbereiche. Nur bei dem mobilen Objekt ganz rechts ist unklar, ob es sich, falls es sich außerhalb des Toleranzstreifens befinden sollte, inner- oder außerhalb des angefragten Gebiets befindet – es muss seine Position bestimmen.

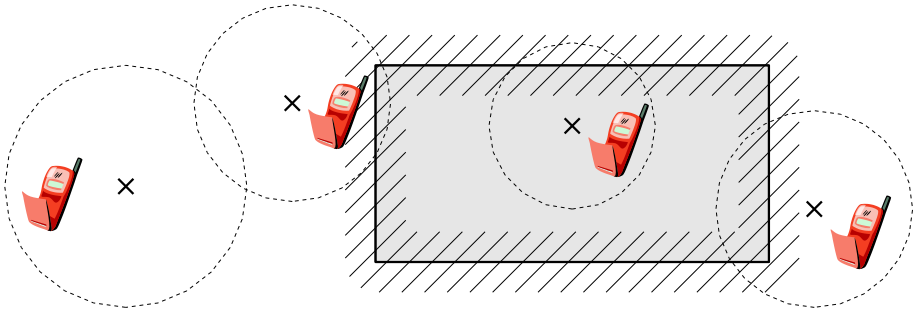


Abbildung 6.1: Gebietsanfrage mit Toleranzstreifen und möglichen Aufenthaltsbereichen

Gebietpositionsanfragen Außerhalb des angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage gelten die eben genannten Ausführungen, da die Zahl der Positionsbestimmungen wie bei Gebietsanfragen minimiert werden kann.

Innerhalb des angefragten Gebiets gelten die Ausführungen zu Positionsanfragen aus Kapitel 5. Das heißt, bei diskreten Gebietspositionsanfragen muss die Position nur bestimmt werden, wenn die zuletzt bestimmten Positionsdaten der erlaubten Toleranz nicht genügen.

Bei kontinuierlichen Gebietspositionsanfragen, die eine zeitliche Toleranz T_A erlauben, ist die minimal benötige Positionsbestimmungsrate T_A^{-1}.

Erlaubt eine kontinuierliche Gebietspositionsanfrage eine räumliche Toleranz d_A, so ist die minimal benötigte Positionsbestimmungsrate eigentlich $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/d_A$. Zur Minimierung des Energieverbrauchs ist die Zahl der Positionsbestimmungen aber gegenüber der Zahl der Positionsübermittlungen abzuwägen, wie in Abschnitt 5.4 ausführlich diskutiert.

6.2 Minimale Zahl an Positionsübermittlungen

Ob diskret oder kontinuierlich – auf eine Positionsübermittlung kann in jedem Fall verzichtet werden, wenn die dem Lokationsdienst zuletzt übermittelten Positionsdaten eines angefragten mobilen Objekts zur Beantwortung der Anfrage entsprechend der erlaubten Toleranz genügen. Dies ist der Fall, wenn die Positionsdaten den in Abschnitt 6.1 vorgestellten Formeln genügen.

Liegen dem Lokationsdienst keine passenden Positionsdaten vor, so muss das betroffene mobile Objekt prinzipiell seine Position übermitteln.

Allerdings kann durch den Verzicht darauf indirekt eine Antwort mitgeteilt werden. Bei zweiwertigen Antworten, wie dem Enthaltensein in einem gewissen Gebiet, ist dies besonders einfach. Bei diskreten Anfragen und bei Beginn einer kontinuierlichen Anfrage setzt dies voraus, dass der Lokationsdienst nach der letzten Positionsübermittlung eine gewisse Zeitspanne abwartet, bevor er die Anfrage beantwortet. Der Lokationsdienst muss nach der Zeitspanne sicher sein, dass er alle Positionsübermittlungen erhalten hat. Werden, wie oben beschrieben, mobile Objekte in Funkzellen außerhalb des angefragten Gebiets nicht über die Anfrage informiert, so muss diese Zeitspanne sowieso abgewartet werden.

Das von den mobilen Objekten und dem Lokationsdienst verwendete Verfahren sollte so gewählt werden, dass möglichst oft auf Positionsübermittlungen verzichtet werden kann, damit die mobilen Objekte Energie sparen. Je nach Anfragetyp liegen verschiedene Vorgehensweisen nahe:

- *Diskrete Gebietsanfragen:* Ein mögliches Vorgehen ist, dass nur mobile Objekte, die aus

neueren Positionsdaten wissen, dass sie sich innerhalb des angefragten Gebiets befinden, ihre Position übermitteln. Die anderen verzichten darauf.

Alternativ könnten alle mobilen Objekte ihre Position übermitteln, die der zuletzt übermittelten Position nach zur Antwort gehören würden, das angefragte Gebiet inzwischen aber verlassen haben oder umgekehrt.

Werden mobile Objekte in Funkzellen außerhalb des angefragten Gebiets nicht über die Anfrage informiert, obwohl die Funkzelle in derselben Location Area wie das angefragte Gebiet liegt, so muss das erste Vorgehen verwendet werden.

- *Diskrete Gebietspositionsanfragen:* Da mobile Objekte innerhalb des angefragten Gebiets ihre Position übermitteln müssen, wenn die zuletzt übermittelten Positionsdaten der Toleranz nicht genügen, muss das bei Gebietsanfragen zuerst genannte Vorgehen verwendet werden.

  Mobile Objekte innerhalb des angefragten Gebiets können bei zeitlicher oder räumlicher Toleranz gegebenenfalls auf eine Positionsübermittlung verzichten, wie bei einer diskreten Positionsanfrage. Bei räumlicher Toleranz ist Verzicht nur möglich, wenn der Lokationsdienst an Hand des ihm bekannten momentan möglichen Aufenthaltsbereichs unterscheiden kann, ob die Positionsübermittlung wegen des Verlassens des angefragten Gebiets unterblieben ist oder weil die dem mobilen Objekt bekannten Positionsdaten der räumlichen Toleranz genügen. Das heißt, der dem Lokationsdienst bekannte momentan mögliche Aufenthaltsbereich darf keinen Punkt außerhalb des Toleranzstreifens und des angefragten Gebiets haben.

- *Kontinuierliche Gebietsanfragen:* Zur Beantwortung einer kontinuierlichen Gebietsanfrage ist eine Positionsübermittlung nur beim Betreten oder Verlassen des angefragten Gebiets erforderlich. Da Betreten und Verlassen im Allgemeinen einzelne, unabhängige Ereignisse sind, wird die Zahl der Positionsübermittlungen durch dieses Vorgehen normalerweise minimiert.

  Bei räumlicher Toleranz sind Ausnahmen möglich. Die Positionsübermittlung kann so lange verzögert werden, bis das mobile Objekt den Toleranzstreifen durchquert hat. Wendet ein mobiles Objekt innerhalb des Toleranzstreifens und verlässt ihn auf der Seite, von der es ihn betreten hat, so ist keine Positionsübermittlung erforderlich – auch wenn das mobile Objekt das angefragte Gebiet zwischendurch sogar mehrfach betreten und verlassen hat.

  Wird die Positionsübermittlung entsprechend hinausgezögert, so sind im Gegenzug mehr Positionsbestimmungen erforderlich. Da die eben beschriebene Bewegung nur selten auftritt, ist zur Energieschonung die Zahl der Positionsbestimmungen zu minimieren und die Position zu übermitteln, sobald das angefragte Gebiet betreten oder verlassen wurde.

  Dies ist anders als bei Positionsanfragen. Wie in Abschnitt 5.4 beschrieben, darf bei diesen zur Minimierung des Energieverbrauchs weder die Zahl der Positionsübermittlungen noch die der Positionsbestimmungen minimiert werden. Abhängig vom Verhältnis der Energiekosten für Positionsübermittlung zu -bestimmung liegt das Optimum dazwischen.

  Bei hoher kontinuierlicher Anfragelast, wenn die Ränder der angefragten Gebiete sehr dicht liegen, sind Betreten und Verlassen keine einzelnen unabhängigen Ereignisse. Ist

beispielsweise der Abstand zwischen zwei angefragten Gebieten sehr gering, so wird häufig nachdem das eine verlassen wurde, gleich das zweite betreten. Die Zahl der Positionsübermittlungen kann durch ein Koppelnavigationsprotokoll minimiert werden.

- *Kontinuierliche Gebietspositionsanfragen:* Positionsübermittlungen werden nur innerhalb des angefragten Gebiets entsprechend der Toleranz benötigt. Bei zeitlicher Toleranz T_A muss die Position mit der Rate T_A^{-1} übermittelt werden, wie bei einer kontinuierlichen Positionsanfrage. Bei räumlicher Toleranz muss die Position eigentlich nur direkt vor Verlassen des Toleranzkreises übermittelt werden – zur Minimierung des Energieverbrauchs ist die Zahl der Positionsbestimmungen aber gegenüber der Zahl der Positionsübermittlungen abzuwägen, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben.

  Bei hoher Anfragelast gibt es nur sehr wenige Bereiche, die von keinem angefragten Gebiet überdeckt sind. Noch offensichtlicher als bei kontinuierlichen Gebietsanfragen, lohnt sich, ständig ein Koppelnavigationsprotokoll zu verwenden.

6.3 Lösungsraum

In den vorherigen beiden Abschnitten wurde beschrieben, wie viele Positionsbestimmungen und -übermittlungen minimal benötigt werden. Wird das oben beschriebene Vorgehen konsequent umgesetzt, so ist der Energieverbrauch durch Positionsbestimmungen und -übermittlungen minimal. Allerdings setzt dies voraus, dass die mobilen Objekte sehr umfassend über die angefragten Gebiete informiert werden. Zum Empfang dieser Informationen verbrauchen sie ebenfalls Energie.

Das heißt, der Energieverbrauch setzt sich aus zwei Aspekten zusammen, die gegeneinander abgewogen werden müssen. Der eine Aspekt ergibt sich aus der Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen – der andere Aspekt aus der Zahl und Länge der Nachrichten, mit denen der Lokationsdienst die mobilen Objekte über die Anfragen informiert.

Zur Minimierung des Energieverbrauchs muss das richtige Verhältnis zwischen beiden Aspekten gefunden werden. Häufig dürfen die mobilen Objekte nur teilweise über die angefragten Gebiete informiert werden, so dass sie nur wenige Nachrichten empfangen müssen und im Gegenzug etwas mehr Positionsbestimmungen und -übermittlungen, als tatsächlich benötigt, vornehmen.

In Abschnitt 2.8 wurden existierende Ansätze genannt, wie die mobilen Objekte über die angefragten Gebiete informiert werden können. An der Unterschiedlichkeit der dort genannten Verfahren lässt sich erkennen, dass der Lösungsraum für Verfahren zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen sehr groß ist. Bevor konkrete Ansätze und Verfahren diskutiert werden, wird der Lösungsraum genauer untersucht.

Dimensionen des Lösungsraums Zur Energieschonung müssen die diskreten und kontinuierlichen Varianten der Gebiets- und Gebietspositionsanfragen gemeinsam betrachtet werden. Eine strikte Trennung ist nicht möglich. Nur wenn für beide Varianten kompatible Verfahren verwendet werden, kann der Energieverbrauch insgesamt minimiert werden.

Mögliche Ansätze zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen können sich in vielen Kriterien unterscheiden. Die wichtigsten sind:

- *Zentrale, hybride oder verteilte Verarbeitung:* Bei zentraler Verarbeitung werden die Anfragen vollständig beim Lokationsdienst verarbeitet. Die mobilen Objekte sind nur

geringfügig über die angefragten Gebiete informiert. Sie verwenden einfache Algorithmen und sind in diesem Sinne unselbstständig.

Bei hybrider Verarbeitung erfolgt ein wichtiger Teil der Anfrageverarbeitung bei den mobilen Objekten. Sie verwenden komplexe Algorithmen und entscheiden selbstständig wann eine Positionsbestimmung oder -übermittlung notwendig ist. Wegen der Selbstständigkeit müssen die mobilen Objekte weniger Nachrichten empfangen als bei zentraler Verarbeitung. Im Gegenzug sind die Nachrichten häufig länger.

Im Extremfall werden die Anfragen vollständig von den mobilen Objekten verarbeitet. Die Verarbeitung erfolgt verteilt. Der Lokationsdienst muss lediglich die Antworten der einzelnen mobilen Objekte zusammenfassen und an die anfragende Anwendung weiterleiten.

- *Generelles oder individuelles Informieren der mobilen Objekte:* Die mobilen Objekte können individuell über die angefragten Gebiete informiert werden oder generell in einem Broad- oder Multicast.

  Im Broad- oder Multicast können die mobilen Objekte sehr genau über die angefragten Gebiete informiert werden. Bei individuellem Informieren müssen die Nachrichten relativ kurz sein, um das Mobilkommunikationssystems nicht zu überlasten. Genaue Informationen über angefragte Gebiete können nur selten gesendet werden.

  Individuelles Informieren ist bei hoher Selektivität der Anfragen notwendig, das heißt, wenn in den Anfragen sehr unterschiedliche Gruppen mobiler Objekte angefragt werden. Bei geringer Selektivität können viele mobile Objekte gemeinsam über neue Anfragen informiert werden.

- *Abstraktion von den einzelnen Anfragen:* Bei geringer Abstraktion kennen die mobilen Objekte die Anfragen als solche. Sie können einzelne Anfragen und das zugehörige angefragte Gebiet identifizieren.

  Bei hoher Abstraktion teilt ihnen der Lokationsdienst in irgendeiner Form die Lage der angefragten Gebiete und deren Ränder mit. Die mobilen Objekte können nicht entscheiden, welches Randstück zu welcher Anfrage gehört. Sogar die Zahl der Anfragen kann unbekannt sein. Zur Positionsübermittlung beim Betreten oder Verlassen eines angefragten Gebiets reicht dies völlig aus. Wie später zu sehen, können die mobilen Objekte im Extremfall nicht einmal entscheiden, wo eine Gebiets- und wo eine Gebietspositionsanfrage liegt.

  Normalerweise gilt, je höher die Abstraktion, desto kürzer die Nachrichten des Lokationsdienstes. Im Gegenzug wird die Selektivität von Anfragen nur schlecht unterstützt. Die mobilen Objekte können ohne zusätzliche Informationen nicht entscheiden, welcher Teil der angefragten Gebiete sie betrifft und welcher nicht.

  Problematisch sind auch bewegliche Anfragen. Bei hoher Abstraktion kann der Lokationsdienst nicht einfach mitteilen, welche Anfrage sich wohin bewegt hat. Stattdessen sind die angefragten Gebiete neu mitzuteilen.

- *Schärfe mit der die mobilen Objekte die angefragten Gebiete kennen:* Mit Schärfe wird bezeichnet, wie genau die mobilen Objekte die geometrische Form der angefragten Gebiete kennen. Bei sehr hoher Schärfe kennen die mobilen Objekte die Ränder der angefragten Gebiete exakt. Das erfordert nicht, dass sie die einzelnen Anfragen unterscheiden können. Hohe Schärfe und geringe Abstraktion schließen sich nicht aus.

Bei geringer Schärfe kennen sie die Form der angefragten Gebiete nur grob. Wird den mobilen Objekten beispielsweise statt des angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage nur ein Rechteck mitgeteilt, das dieses vollständig enthält, und übermitteln die mobilen Objekte ihre Position innerhalb des Rechtecks entsprechend der erlaubten Toleranz, so kann der Lokationsdienst die Anfrage beantworten, obwohl die mobilen Objekte das angefragte Gebiet nur sehr unscharf kennen.

Je geringer die Schärfe, desto kürzer sind die Nachrichten, die der Lokationsdienst an die mobilen Objekte sendet, um sie über die angefragten Gebiete zu informieren. Im Gegenzug müssen mehr Positionsbestimmungen und -übermittlungen vorgenommen werden.

Wird der unscharfe Bereich großzügig gewählt, so kann sich das Parameterobjekt einer beweglichen Anfrage geringfügig bewegen, ohne dass die angefragten mobilen Objekte darüber informiert werden müssen.

- *Fläche über die die mobilen Objekte informiert werden:* Bei kontinuierlichen Gebiets- und Gebietspositionsanfragen ist die Fläche, über die die mobilen Objekte vorab informiert werden, prinzipiell variabel. Der Lokationsdienst kann ihnen nur die angefragten Gebiete in nächster Umgebung mitteilen oder auch die in größerer Entfernung.

  Das eine Extrem ist, wenn die mobilen Objekte über das komplette Dienstgebiet informiert werden. Das andere, wenn die mobilen Objekte überhaupt keine Informationen über die angefragten Gebiete erhalten, sondern nur zu Positionsübermittlungen aufgefordert werden. In diesem Fall sind eine hohe Abstraktion von den einzelnen Anfragen und eine geringe Schärfe automatisch gegeben.

  Für eine große Fläche spricht, dass die mobilen Objekte die Fläche nur selten verlassen und über eine neue Fläche informiert werden müssen. Im Gegenzug werden die mobilen Objekte über angefragte Gebiete informiert, von denen sie weit entfernt sind. Bei hoher diskreter Anfragelast oder ständig neuen kontinuierlichen Anfragen müssen die mobilen Objekte viele Nachrichten empfangen.

  Für eine kleine Fläche spricht, dass die mobilen Objekte fast ausschließlich über Anfrage informiert werden, die sie betreffen. Dafür sind häufig mehr Positionsbestimmungen nötig, um zu erkennen, wann die Fläche verlassen wird und Informationen über die nächste benötigt werden.

- *Individuelle Behandlung der Toleranzen:* Die mobilen Objekte können die Toleranzen der angefragten Gebiete individuell kennen und behandeln oder nur in Form des Minimums. Das Minimum muss nicht für die gesamte Fläche gelten, über die die mobilen Objekte informiert werden, sondern jeweils für einen Ausschnitt davon. Durch die Bildung des Minimums werden mehr Positionsbestimmungen gebraucht, als eigentlich notwendig.

  Die individuelle Behandlung der Toleranzen ist eng mit der Abstraktion von den einzelnen Anfragen verwandt.

Wahl eines Verfahrens nach Anfragelast und Energiekosten Aus dem Einfluss der Dimensionen auf die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen und die Zahl und Länge der Nachrichten, die die mobilen Objekte entgegen nehmen müssen, lässt sich folgern, welche Eigenschaften ein konkretes Verfahren für ein gegebenes Szenario aus Anfragelast und

Energiekosten haben sollte, damit der Energieverbrauch minimiert wird. Des Weiteren müssen auch Aspekte wie bewegliche Anfragen und die Selektivität von Anfragen berücksichtigt werden. Dazu drei Beispiele:

1. *Szenario:* Die Energiekosten für Positionsbestimmung und -übermittlung sind hoch. Die Selektivität der Anfragen ist gering. Es gibt keine beweglichen Anfragen.

   Zur Minimierung des Energieverbrauchs muss die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen möglichst nah am benötigten Minimum sein. Dazu müssen die mobilen Objekte die angefragten Gebiete sehr genau kennen. Dies erfordert hybride Verarbeitung und hohe Schärfe. Die Toleranzen sollten möglichst individuell behandelt werden.

2. *Szenario:* Die Energiekosten für den Empfang von Nachrichten sind relativ hoch, verglichen mit denen für Positionsbestimmung und -übermittlung. Ständig erreichen neue diskrete und kontinuierliche Anfragen den Lokationsdienst.

   Die mobilen Objekte sollten nur unscharf und mit hoher Abstraktion über die angefragten Gebiete informiert werden. Die Fläche, über die ein mobiles Objekt informiert wird, sollte relativ klein sein. Dadurch sind die zu empfangenden Nachrichten sehr kurz.

3. *Szenario:* Innerhalb des Dienstgebiets gibt es nur einige wenige kontinuierliche Anfragen mit langer Lebensdauer. Die Selektivität der Anfragen ist hoch. Ein Teil der Anfragen ist beweglich. Eine Positionsübermittlung verbraucht viel Energie.

   Die mobilen Objekte sollten möglichst scharf und mit geringer Abstraktion über die angefragten Gebiete informiert werden. Wegen der langen Lebensdauer könnte die Fläche, über die ein mobiles Objekt informiert wird, eigentlich relativ groß gewählt werden. Doch die beweglichen Anfragen erfordern regelmäßig den Empfang von Nachrichten über ihre Bewegung. Damit die mobilen Objekte nicht über Bewegungen eines weit entfernten angefragten Gebiets informiert werden, sollte die Fläche eher klein gewählt werden.

Einordnung vorhandener Verfahren in den Lösungsraum In Abschnitt 2.8 wurden die wichtigsten existierenden Verfahren zur Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen vorgestellt: SafeRegions, MQM und MobiEyes.

Bei MQM und MobiEyes wird ein Gitternetz über das Dienstgebiet gelegt. Ein mobiles Objekt wird über alle kontinuierlichen Gebietsanfragen informiert, deren angefragtes Gebiet beziehungsweise deren Rand die Gitterzelle schneiden, in der es sich gerade aufhält. Bei SafeRegions wird jedem mobilen Objekt ein Bereich SafeSphere oder SafeRect mitgeteilt, in dem es sich frei bewegen kann, ohne seine Position übermitteln zu müssen. Normalerweise berühren ein oder mehrere Stellen der SafeSphere oder des SafeRect die Ränder angefragter Gebiete.

Bei MQM und MobiEyes übernehmen die mobilen Objekte die eigentliche Verarbeitung der Anfragen – sie erfolgt verteilt. Bei SafeRegions werden die Anfragen hybrid verarbeitet.

Bei MQM und MobiEyes werden die mobilen Objekte innerhalb einer Gitterzelle alle gleich behandelt. Bei SafeRegions werden die mobilen Objekte völlig individuell behandelt. Die Schärfe, mit der die mobilen Objekte die angefragten Gebiete kennen, ist bei SafeRegions gering und die Abstraktion hoch. Bei MQM und MobiEyes ist es umgekehrt.

Bei MQM wird die Fläche, über die ein mobiles Objekt informiert wird, abhängig von der Rechenleistung gewählt. Bei MobiEyes wird jeweils genau eine Gitterzelle verwendet. Über die Größe der Gitterzellen kann die Fläche vorab und für alle mobilen Objekte gleich eingestellt

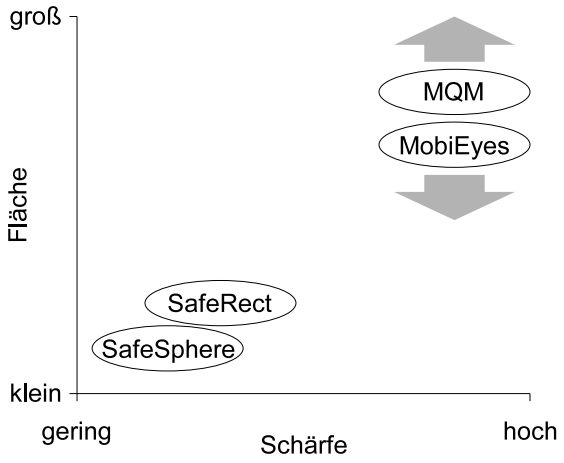


Abbildung 6.2: Lösungsraum bei verteilter Verarbeitung kontinuierlicher Gebietsanfragen

werden. Bei SafeRegions hängt die Fläche von der konkreten Position des mobilen Objekts ab. Der Flächeninhalt eines SafeRects ist im Allgemeinen größer als der einer SafeSphere.

Toleranzen sind bei keinem der drei Verfahren vorgesehen. Prinzipiell lassen sie sich bei MQM und MobiEyes aber individuell berücksichtigen. Bei SafeRegions muss das Minimum der Toleranzen aller angefragten Gebiete verwendet werden, deren Ränder die SafeRegion berühren.

Abbildung 6.2 stellt zwei wichtige Dimensionen des Lösungsraums dar. Die existierenden Verfahren sind darin eingetragen. Auf der Senkrechten ist die Fläche abgetragen, über die die mobilen Objekte informiert werden. Auf der Waagerechten ist die Schärfe abgetragen.

In den nächsten Abschnitten werden vier mögliche Ansätze genau untersucht. In Abschnitt 6.8 werden sie abschließend verglichen. Zu ausgewählten Verfahren werden anschließend detaillierte Simulationsergebnisse vorgestellt.

6.4 Auffordern zur Positionsbestimmung

Bei diesem Ansatz werden die mobilen Objekte in keiner Weise über die angefragten Gebiete informiert. Der Lokationsdienst fordert sie individuell zu Positionsbestimmung und -übermittlung auf, wenn die ihm bekannten Positionsdaten zur Beantwortung einer Gebiet- oder Gebietspositionsanfrage nicht mehr ausreichen.

Diskrete Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Zunächst kann der Lokationsdienst, wie in Abschnitt 6.1 beschrieben, an Hand der ihm bekannten möglichen Aufenthaltsbereiche ermitteln, von welchen mobilen Objekten er neue Positionsdaten benötigt und von welchen nicht.

Der Lokationsdienst fordert die betroffenen mobilen Objekte wie bei einer Positionsanfrage zu einer Positionsübermittlung auf. Die Aufforderung muss nur in Mobilfunkzellen gesendet werden, die den Rand des angefragten Gebiets schneiden oder innerhalb des angefragten Gebiets liegen. Allerdings kann nicht auf vorhandene Gruppen zurückgegriffen werden. Die Aufforderungen müssen individuell oder als komplexer Multicast gesendet werden.

Empfängt ein mobiles Objekt die Aufforderung nicht, so befindet es sich in einer Zelle fern

des angefragten Gebiets. Am Ausbleiben der Positionsübermittlung kann der Lokationsdienst erkennen, dass es nicht zur Antwort gehört.

Kontinuierliche Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Bei kontinuierlichen Gebietsanfragen müssen die mobilen Objekte nach der initialen Antwort regelmäßig zu Positionsbestimmungen und -übermittlungen aufgefordert werden. Bei vielen Anfragen und mobilen Objekten kann die Übertragungskapazität des Mobilkommunikationssystems zum Engpass werden.

Innerhalb eines angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage und nahe dem Rand müssen Positionsbestimmung und -übermittlung sehr häufig erfolgen. Gleiches gilt nahe dem Rand von Gebietsanfragen. In diesem Fall ist ein Wechsel in ein berichtendes Protokoll, wie bei einer kontinuierlichen Positionsanfrage, energieschonender.

Bei beweglichen Anfragen kann die Positionsbestimmungs- und -übermittlungsrate des Parameterobjekts an die momentanen Positionen der angefragten mobilen Objekte angepasst werden. Betrifft eine bewegliche Anfrage nur mobile Objekte, die gerade relativ weit vom Rand des angefragten Gebiets entfernt sind, so muss die Position des Parameterobjekts nur selten bestimmt werden.

Einordnung in den Lösungsraum und besondere Merkmale Die Anfragen werden zentral verarbeitet und die mobilen Objekte individuell behandelt. Da die mobilen Objekte nicht über die Anfragen informiert werden, ist die Abstraktion hoch und die Schärfe gering.

Trotz der geringen Schärfe ist die Zahl der Positionsbestimmungen minimal – vorausgesetzt, dass die mobilen Objekte auch sonst jede neuerlich bestimmte Position sofort an den Lokationsdienst übermitteln. Ansonsten kann es passieren, dass ein mobiles Objekt seine Position nach Aufforderung bestimmt und übermittelt, obwohl es aus einer zurückliegenden Positionsbestimmung über Positionsdaten verfügt hätte, die zur Beantwortung der Anfrage ausgereicht hätten.

Die Zahl der Positionsübermittlungen ist hingegen sehr hoch, besonders bei kontinuierlichen Gebietsanfragen, bei denen eine Positionsübermittlung eigentlich nur bei Betreten oder Verlassen des angefragten Gebiets notwendig ist.

6.5 SafeRegions

Der SafeRegion-Ansatz wurden bereits in Abschnitt 6.3 diskutiert und in den Lösungsraum eingeordnet. Im Folgenden wird betrachtet, wie er mit diskreten Anfragen verwendet werden kann und wie häufig die Position bei kontinuierlichen Anfragen bestimmt werden muss.

Diskrete Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Bei diskreten Gebietsanfragen kann der SafeRegion-Ansatz nur in abgewandelter Form verwendet werden.

Kann der Lokationsdienst an Hand des momentan möglichen Aufenthaltsbereichs eines mobilen Objekts nicht entscheiden, ob sich dieses inner- oder außerhalb des angefragten Gebiets aufhält, so teilt er diesem eine SafeRegion um die zuletzt übermittelte Position mit. Die SafeRegion liegt entweder vollständig außerhalb oder vollständig innerhalb des angefragten Gebiets, je nachdem, wo die zuletzt übermittelte Position liegt.

Befindet sich das mobile Objekt noch innerhalb der SafeRegion, so braucht es seine Position nicht zu übermitteln. Liegt der ihm bekannte momentane Aufenthaltsbereich vollständig innerhalb der SafeRegion, so braucht es seine Position nicht einmal zu bestimmen.

Bei zeitlicher Toleranz T_A kann auf eine Positionsübermittlung verzichtet werden, wenn sich das mobile Objekt zum Zeitpunkt $t - T_A$ noch innerhalb der SafeRegion aufgehalten hat. Bei räumlicher Toleranz d_A braucht die Position auch außerhalb der SafeRegion nicht zu übermittelt werden, wenn das mobile Objekt momentan nicht weiter als d_A von der SafeRegion entfernt ist.

Bei Gebietspositionsanfragen können SafeRegions nur außerhalb des angefragten Gebiets verwendet werden. Befindet sich ein mobiles Objekt innerhalb des angefragten Gebiets oder liegt dessen zuletzt übermittelte Position darin, so kann auf die Positionsübermittlung nur verzichtet werden, wenn die aktuelle Position der räumlichen Toleranz genügt.

Kontinuierliche Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Der Lokationsdienst teilt jedem mobilen Objekt individuell in einer kurzen Nachricht seine SafeRegion zu. Wie häufig eine neue SafeRegion berechnet und übermittelt werden muss, hängt davon ab, wie groß die SafeRegions sind und damit von der Dichte der Ränder der angefragten Gebiete. Außerdem davon, wie schnell sich ein mobiles Objekt bewegt und wie häufig neue Anfragen hinzukommen, die die SafeRegion schneiden und eine Neuberechnung erfordern.

Je näher ein mobiles Objekt dem Rand seiner SafeRegion kommt, desto häufiger muss es seine Position bestimmen. Wie hoch die Positionsbestimmungsrate direkt am Rand der SafeRegion ist, hängt vom Minimum der erlaubten Toleranzen der benachbarten Anfragen ab. Es gelten die Positionsbestimmungsraten T_A^{-1} beziehungsweise $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/d_A$. Sobald das mobile Objekt nach einer Positionsbestimmung feststellt, dass es seine SafeRegion verlassen hat, übermittelt es seine Position an den Lokationsdienst.

Innerhalb des angefragten Gebiets einer kontinuierlichen Gebietspositionsanfrage gibt es keine SafeRegions. Zur Energieschonung muss ein berichtendes Protokoll, wie bei einer kontinuierlichen Positionsanfrage verwendet werden.

Grenzt eine SafeRegion an eine bewegliche Gebietsanfrage oder liegt sie in einer solchen, so muss sie, wenn sich der Rand der Gebietsanfrage in die SafeRegion hineinbewegt, verkleinert werden. Entweder muss der Lokationsdienst die SafeRegion ständig neu berechnen und dem mobilen Objekt mitteilen oder das mobile Objekt muss die SafeRegion selbstständig, entsprechend der Maximalgeschwindigkeit des Parameterobjekts, verkleinern.

Einordnung in den Lösungsraum und besondere Merkmale Der SafeRegion-Ansatz wurde oben bereits in den Lösungsraum eingeordnet.

Die Zahl der Positionsbestimmungen ist nicht minimal. Ein mobiles Objekt bestimmt dicht vor dem Rand der SafeRegion seine Position sehr häufig, auch wenn dahinter kein Rand eines angefragten Gebiets liegt.

Aus dem gleichen Grund ist die Zahl der Positionsübermittlungen nicht minimal. Das Verlassen einer SafeRegion garantiert nicht, dass gleichzeitig ein angefragtes Gebiet betreten oder verlassen wird. Bei den in [CHC 2004, Kapitel 5] beschriebenen Simulationen ist die Zahl der Positionsübermittlungen bei Verwendung einer kreisförmigen SafeRegion drei- bis viermal höher als beim Mitteilen von Anfragen mit dem Verfahren MQM.

6.6 Anfragen Mitteilen

Dieser Ansatz wurde mit MQM und MobiEyes bereits in Abschnitt 6.3 in den Lösungsraum eingeordnet. Zur Energieschonung sind einige Änderungen im Vergleich zu MQM und

MobiEyes erforderlich. Außerdem wird diskutiert, wie er mit diskreten Anfragen verwendet werden kann.

Prinzipiell informiert der Lokationsdienst die mobilen Objekte direkt über die angefragten Gebiete. Da die Zahl der angefragten Gebiete im gesamten Dienstgebiet sehr groß sein kann, werden die mobilen Objekte jeweils nur über Anfragen in ihrer Nähe informiert.

Damit nicht jedes mobile Objekt separat behandelt werden muss, wird das Dienstgebiet in Zellen partitioniert. Alle mobilen Objekte in einer Zelle werden gemeinsam behandelt. Zur Partitionierung kann ein virtuelles Gitternetz, wie bei MQM und MobiEyes, oder können die vorhandenen Location Areas verwendet werden.

Die mobilen Objekte sind vorab über die Partitionierung des Dienstgebiets informiert und wissen jederzeit, in welcher Zelle sie sich gerade befinden. Wechselt ein mobiles Objekt seine Zelle, so informiert es den Lokationsdienst darüber, so dass dieser jederzeit weiß, in welcher Zelle sich ein mobiles Objekt gerade aufhält. Nachrichten über angefragte Gebiete werden je Zelle formuliert und müssen nur in den zugehörigen Funkzellen gesendet werden. Jede Nachricht enthält die Kennung der Zelle, die sie betrifft. Empfängt ein mobiles Objekt eine Nachricht, die eine andere als seine Zelle betrifft, so kann es die Nachricht sofort verwerfen.

Die Zellen sollten relativ groß gewählt werden, so dass Zellwechsel nicht allzu häufig sind und eine Funkzelle nur wenige Zellen enthält.

Zur Energieschonung müssen sich die Zellen, anders als bei MQM und MobiEyes, großzügig überlappen. Durch die Überlappung entsteht ein Toleranzstreifen, der zur Reduzierung der Positionsbestimmungsrate vor dem Rand einer Zelle genutzt werden kann. Ohne Überlappung müssen die mobilen Objekte ihre Position dicht vor den Zellrändern sehr häufig bestimmen, um einen Zellwechsel festzustellen, auch wenn die Ränder der angefragten Gebiete weit entfernt sind. Liegt ein angefragtes Gebiet ganz oder teilweise in dem Toleranzstreifen, so betrifft es beide Zellen.

Diskrete Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Erhält der Lokationsdienst eine diskrete Gebiets- oder Gebietspositionsanfrage, so berechnet er zunächst, welche Zellen von der Anfrage betroffen sind. Bei Gebietsanfragen sind dies alle Zellen, die vom Rand des angefragten Gebiets geschnitten werden und bei Gebietspositionsanfragen alle Zellen, die vom angefragten Gebiet ganz oder teilweise überdeckt werden. Häufig wird ein angefragtes Gebiet nur in einer oder wenigen Zellen liegen.

Der Lokationsdienst informiert die mobilen Objekte der betroffenen Zellen über das angefragte Gebiet. Es reicht aus, die mobilen Objekte einer Zelle nur über den Teil des angefragten Gebiets zu informieren, der in ihrer Zelle liegt.

Betrifft die Anfrage nur eine bestimmte Gruppe mobiler Objekte, so sollte sie, falls möglich, im Multicast nur an diese gesendet werden.

Empfängt ein mobiles Objekt Informationen über ein angefragtes Gebiet seiner Zelle, die es betreffen, so prüft es, ob die zuletzt übermittelten Positionsdaten für die Antwort genügen. Falls die zuletzt übermittelten Positionsdaten nicht ausreichen, prüft es ob, die zuletzt bestimmten Positionsdaten ausreichen. Gegebenenfalls nimmt es eine Positionsbestimmung vor. Eine Positionsübermittlung ist nur erforderlich, wenn sich das mobile Objekt innerhalb des angefragten Gebiets befindet, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben.

Natürlich muss der Lokationsdienst die mobilen Objekte erst gar nicht über die Anfrage informieren, wenn die ihm bereits bekannten Positionsdaten zur Beantwortung ausreichen.

Kontinuierliche Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Positionsbestimmung und -übermittlung erfolgen wie in den Abschnitten 6.1 und 6.2 beschrieben. Nur für eventuelle Zellwechsel werden zusätzliche Positionsbestimmungen und -übermittlungen benötigt.

Erhält der Lokationsdienst eine neue kontinuierliche Anfrage, so informiert er die mobilen Objekte in den betroffenen Zellen wie bei einer diskreten Anfrage darüber. Der Energieverbrauch für den Empfang hängt von der Komplexität der geometrischen Beschreibung der angefragten Gebiete ab.

Reichen die zuletzt übermittelten Positionsdaten aller mobilen Objekte in einer betroffenen Zelle für die initiale Antwort aus, so kann das Mitteilen des angefragten Gebiets in dieser Zelle verzögert werden, bis die Positionsdaten nicht mehr ausreichen.

Wird eine kontinuierliche Anfrage zurückgezogen, so werden die mobilen Objekte der betroffenen Zellen entsprechend darüber informiert.

Wechselt ein mobiles Objekt die Zelle, so ist dies gesondert zu behandeln. Es gibt zwei Möglichkeiten:

1. *Unicast:* Der Lokationsdienst teilt dem mobilen Objekt individuell die angefragten Gebiete der neuen Zelle mit, die zu Anfragen gehören, in denen das mobile Objekt angefragt wird. Dieses Vorgehen eignet sich vor allem bei sehr selektiven Anfragen.

2. *Broadcast:* Der Lokationsdienst verzichtet auf individuelle Benachrichtigung. Stattdessen teilt er die angefragten Gebiete periodisch in einem Broadcast mit. Ein mobiles Objekt, das sich in der Nähe einer neuen Zelle befindet, empfängt den Broadcast und ist vorab über alle Anfragen der Nachbarzelle informiert, bevor es sie betritt. Dieses Vorgehen ist nicht nur bei wenig selektiven Anfragen, sondern auch bei relativ kleinen Zellen sinnvoll. Bei kleinen Zellen sind Zellwechsel häufiger als bei großen Zellen. Würden die mobilen Objekte einzeln über die Anfragen informiert, so müsste der Lokationsdienst viel mehr Nachrichten senden.

Bei beweglichen Anfragen reicht es aus, wenn der Lokationsdienst die Bewegung des Parameterobjekts übermittelt. Die mobilen Objekte der betroffenen Zellen können diese Bewegung auf die Bewegung des zugehörigen angefragten Gebiets abbilden. In [GL 2004, Abschnitt 3.4] wird vorgeschlagen, ein Koppelnavigationsprotokoll zum Übermitteln der Bewegung des Parameterobjekts zu verwenden. Dies erfordert nur sehr wenige Positionsübermittlungen.

Allerdings kann ein Koppelnavigationsprotokoll nur bei räumlicher Toleranz verwendet werden. Bei zeitlicher Toleranz ist das periodisch berichtende Protokoll zu verwenden.

In beiden Fällen muss die Toleranz, die die Anfrage erlaubt, auf das berichtende Protokoll des Parameterobjekts und das angefragte Gebiet aufgeteilt werden. Vor allem bei einer Gebietspositionsanfrage sollte die räumliche Toleranz für das Parameterobjekt zur Minimierung des Gesamtenergieverbrauchs sehr gering gewählt werden – umso höher ist die erlaubte Toleranz innerhalb des angefragten Gebiets, entsprechend der die enthaltenen mobilen Objekte ihre Positionen übermitteln. Von der geringen Toleranz beim Parameterobjekt ist nur ein mobiles Objekt betroffen, von der Toleranz im angefragten Gebiet normalerweise viele.

Einordnung in den Lösungsraum und besondere Merkmale Wie bereits genannt, erfolgt die Verarbeitung der Anfragen fast vollständig bei den mobilen Objekten.

Abgesehen von möglichen Positionsbestimmungen wegen eines Zellwechsels, die wie oben beschrieben sehr gering gehalten oder mit Location Areas ganz vermieden werden können, ist die Zahl der Positionsbestimmungen minimal. Gleiches gilt für die Zahl der Positionsübermittlungen.

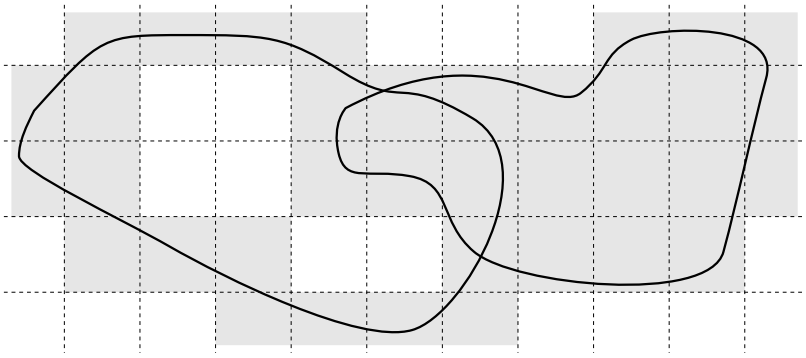


Abbildung 6.3: Grid mit einer Gebiets- und einer Gebietspositionsanfrage

6.7 Grid-Verfahren

Wie in Abschnitt 6.3 diskutiert, setzt sich der Energieverbrauch bei der Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen aus zwei Aspekten zusammen, die zu dessen Minimierung gegeneinander abgewogen werden müssen: Der eine Aspekt ergibt sich aus der Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen – der andere Aspekt aus der Zahl und Länge der Nachrichten, mit denen der Lokationsdienst die mobilen Objekte über die Anfragen informiert.

Die bisher vorgestellten Ansätze bieten in sich kaum Parameter, über die diese beiden Aspekte abgewogen werden können.

Im Folgenden wird ein Verfahren entwickelt, bei dem sich diese beiden Aspekte über die Schärfe, mit der die mobilen Objekte die angefragten Gebiete kennen, gut abwägen lassen. Je geringer die Schärfe, desto kürzer die Nachrichten, die die mobilen Objekte empfangen müssen. Im Gegenzug sind mehr Positionsbestimmungen und -übermittlungen erforderlich als eigentlich benötigt. Bei hoher Schärfe müssen die mobilen Objekte viele und lange Nachrichten empfangen, dafür ist die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen fast minimal.

Die Grundidee ist, dass die angefragten Gebiete auf ein Gitternetz, das Grid, abgebildet werden – daher der Name Grid-Verfahren. Der Lokationsdienst markiert alle Gridzellen, die den Rand einer Gebietsanfrage oder das angefragte Gebiet einer Gebietspositionsanfrage schneiden. Solche Gridzellen heißen aktiv. Alle anderen werden passiv genannt. Das Muster aus aktiven und passiven Gridzellen wird Gridmuster genannt.

Bei mehreren parallel gestellten Anfragen wird von den einzelnen angefragten Gebieten abstrahiert. Im Gridmuster ist nur die Vereinigung der Ränder beziehungsweise der angefragten Gebiete vermerkt. Abbildung 6.3 zeigt ein Grid mit einem Gridmuster, in das zwei angefragte Gebiete eingetragen sind. Passive Gridzellen sind weiß. Die linke Anfrage ist eine Gebietsanfrage – wie aus den passiven Gridzellen in der Mitte ersichtlich – und die rechte Anfrage eine Gebietspositionsanfrage.

Der Lokationsdienst übermittelt das Gridmuster im Broad- oder Multicast an die mobilen Objekte. In der Beschreibung des Gridmusters ist angegeben, in welchen aktiven Gridzellen welche Toleranz erlaubt ist. Die mobilen Objekte bestimmen und übermitteln ihre Position entsprechend, so dass der Lokationsdienst die Gebiets- und Gebietspositionsanfragen mit den ihm übermittelten Positionsdaten vollständig beantworten kann.

Wie beim Mitteilen von Anfragen wird zusätzlich ein grobes Gitternetz benötigt, damit den

mobilen Objekten nicht das Gridmuster des ganzen Dienstgebiets mitgeteilt werden muss, sondern immer nur ein Teil davon. Für das grobe Gitternetz kann wiederum auf Funkzellen oder Location Areas zurückgegriffen werden.

Diskrete Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Reichen die dem Lokationsdienst bekannten Positionsdaten zur Beantwortung der Anfrage aus, so beantwortet er sie sofort. Ansonsten übermittelt er die von der Anfrage aktivierten Gridzellen an alle angefragten mobilen Objekte. Jedes mobile Objekt, dessen momentaner Aufenthaltsbereich unter Berücksichtigung der Toleranz eine solche Gridzelle schneidet, muss seine Position bestimmen.

Alle mobilen Objekte, die sich in einer aktiven Gridzelle befinden und deren zuletzt übermittelte Position der Toleranz nicht genügt, müssen ihre Position übermitteln.

Auch mobile Objekte, die sich seit der letzten Positionsübermittlung mehrere passive Gridzellen weit bewegt haben, müssen ihre zuletzt bestimmte Position übermitteln, falls diese außerhalb des angefragten Gebiets liegt und die zuletzt übermittelte Position innerhalb, oder umgekehrt.

Da die mobile Objekte die Lage der angefragten Gebiete nur unscharf kennen, können sie dies nicht direkt entscheiden – insbesondere, wenn in einem Gridmuster mehrere angefragte Gebiete eingetragen sind. Existiert allerdings ein Weg aus passiven Gridzellen zwischen der zuletzt übermittelten Position eines mobilen Objekts und der zuletzt bestimmten Position, so verläuft zwischen den beiden kein Rand eines angefragten Gebiets. Das mobile Objekt muss seine Position nicht übermitteln.

Um einen solchen Weg zu finden, sind um die zuletzt übermittelte Position alle passiven Gridzellen mit einem Füllalgorithmus zu markieren. Ist jene Gridzelle markiert, in der die zuletzt bestimmte Position liegt, so kann auf eine Positionsübermittlung verzichtet werden. Andernfalls muss die Position übermittelt werden, weil zwischen der zuletzt übermittelten und der zuletzt bestimmten Position der Rand eines angefragten Gebiets verlaufen kann.

Kontinuierliche Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Jedes mobile Objekt verwaltet lokal ein Gridmuster, in dem alle angefragten Gebiete vermerkt sind. Wann eine Positionsbestimmung oder -übermittlung erforderlich ist, hängt davon ab, in welcher Art von Gridzelle sich ein mobiles Objekte gerade befindet:

- *Passive Gridzellen:* In diesen plant das mobile Objekt die Positionsbestimmungen so, dass es rechtzeitig bemerkt, wenn es sich mit Maximalgeschwindigkeit in die nächste aktive Gridzelle bewegt.

  Entsprechend der erlaubten Toleranz wird die Positionsbestimmung um T_A beziehungsweise $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ später geplant.

- *Aktive Gridzellen:* Betritt das mobile Objekt eine aktive Gridzelle, so wechselt es in ein berichtendes Protokoll und bestimmt und übermittelt seine Position entsprechend an den Lokationsdienst. Je nach Art der Toleranz, zeitlich oder räumlich, sollte das periodisch berichtende Protokoll oder ein Koppelnavigationsprotokoll verwendet werden.

  Die in einer Gridzelle erlaubte Toleranz ergibt sich aus dem Minimum der erlaubten Toleranzen aller Anfragen, die die Gridzelle aktivieren.

Bei diesem Vorgehen übermittelt das mobile Objekt seine Position jedes Mal, wenn es, von einer passiven Gridzelle aus, eine aktive betritt.

Während diese Positionsübermittlung beim periodisch berichtenden Protokoll automatisch gegeben ist, kann beim Koppelnavigationsprotokoll teilweise darauf verzichtet werden. Voraussetzung ist, dass die Vorhersagefunktion auch in den passiven Gridzellen berücksichtigt wird. Da in passiven Gridzellen keine Toleranz definiert ist, muss die Position nur übermittelt werden, wenn die vorhergesagte Bewegung, entgegen der tatsächlichen, in eine aktive Gridzelle führt, oder wenn das mobile Objekt, entgegen der Vorhersage, eine aktive Gridzelle betritt.

Stimmen aber vorhergesagte und tatsächliche Bewegung beim Betreten einer aktiven Gridzelle überein, so ist keine Positionsübermittlung erforderlich. Insbesondere, wenn sich aktive und passive Gridzellen häufig abwechseln, können so Positionsübermittlungen gespart werden.

Erhält der Lokationsdienst eine neue kontinuierliche Anfrage, so prüft er zunächst, welche Gridzellen von der Anfrage aktiviert werden. Ist eine betroffene Gridzelle bereits mit gleicher oder geringerer Toleranz aktiviert, so braucht sie nicht betrachtet zu werden.

Sind alle betroffenen Gridzellen bereits mit gleicher oder geringerer Toleranz aktiviert, so müssen die mobilen Objekte überhaupt nicht über die Anfrage informiert werden. Gleiches kann beim Zurückziehen einer Anfrage passieren. Aus der Abstraktion von den einzelnen Anfragen folgen zwei besondere Stärken des Grid-Verfahrens:

1. *Begrenzter Nachrichtenaufwand:* Die Länge der Beschreibung des Gridmuster und damit die Länge der Nachrichten, die die mobilen Objekte empfangen müssen, hängt im Wesentlichen von der Größe der Gridzellen ab und nicht von der Zahl der kontinuierlichen Anfragen.

2. *Genereller Wechsel in ein berichtendes Protokoll:* Bei hoher Anfragelast erfolgt der in Abschnitt 6.2 vorgeschlagene, generelle Wechsel in ein berichtendes Protokoll automatisch.

Bei hoher Selektivität der Anfragen kann die Abstraktion aber zum Nachteil werden. Eine neue kontinuierliche Anfrage ist noch unproblematisch – anders das Zurückziehen einer solchen.

Die von einer neuen Anfrage aktivierten Gridzellen können die mobilen Objekte selbstständig in das ihnen bekannte Gridmuster einfügen. Ist eine Gridzelle bereits aktiviert, so ist das Minimum der Toleranzen zu bilden.

Beim Zurückziehen einer kontinuierlichen Anfrage dürfen die betroffenen Gridzellen nicht einfach passiv gesetzt werden. Eine solche Gridzelle kann wegen einer anderen kontinuierlichen Anfrage ebenfalls aktiviert sein. Wegen der Selektivität kann dies bei jedem mobilen Objekt anders sein.

Es gibt zwei Möglichkeiten, wie damit umgegangen werden kann. Zum einen können separate Gridmuster verwendet werden und zum anderen, ein gemeinsames Gridmuster, bei dem in den aktiven Gridzellen vermerkt ist, für welche mobilen Objekte sie mit welcher Toleranz gelten. In beiden Fällen geht die Abstraktion von den Anfragen teilweise verloren und der Nachrichtenaufwand erhöht sich.

Bewegliche Anfragen werden vom Grid-Verfahren nicht direkt unterstützt. Sie müssen durch Änderungen am Gridmuster modelliert werden. Kleine Bewegungen des Parameterobjekts führen selten zu einer Änderung am Gridmuster. Indem relativ große Gridzellen verwendet werden oder durch das Aktivieren benachbarter Gridzellen, kann die Häufigkeit der Änderungen klein gehalten werden – oft ist dies wegen der zusätzlichen Positionsbe-

stimmungen und -übermittlungen aber unerwünscht. Größere oder rasche Bewegungen des Parameterobjekts sind auf jeden Fall mit erheblichem Aufwand verbunden.

Alternativ kann für jede bewegliche Anfrage ein separates Gridmuster verwendet werden. Bewegungen des Parameterobjekts werden auf schrittweise Verschiebung aller aktiven Gridzellen abgebildet. Zum Beispiel, indem alle aktiven Gridzellen um eine Gridzelle nach oben verschoben werden. Dies erfordert, dass vorab auch einige benachbarte Gridzellen der eigentlich betroffenen aktiviert werden, so dass kleine Bewegungen des Parameterobjekts, die noch keine Verschiebung erfordern, ohne Änderungen am Gridmuster möglich sind. Zur Planung der nächsten Positionsbestimmung vereinen die mobilen Objekte temporär das Gridmuster für stationäre Anfragen mit den Gridmustern für bewegliche Anfragen.

Auch das eben beschriebene Vorgehen ist bei einer neuen Anfrage zunächst mit erheblichem Aufwand verbunden, denn es muss ein Gridmuster für nur eine Anfrage mitgeteilt werden. Es ist dem zuerst beschriebenen Vorgehen vorzuziehen, wenn die Gridzellen klein sind und sich die Parameterobjekte rasch bewegen.

Einordnung in den Lösungsraum und besondere Merkmale Beim Grid-Verfahren werden die Anfragen hybrid verarbeitet und die mobilen Objekte nicht individuell behandelt. Die Abstraktion von den Anfragen ist sehr hoch. Die mobilen Objekte können Gebiets- von Gebietspositionsanfragen nicht unterscheiden. Die Schärfe, mit der die mobilen Objekte die angefragten Gebiete kennen, kann beliebig eingestellt werden. Gleiches gilt für die Fläche, über die die mobilen Objekte informiert werden. Natürlich muss sie mindestens so groß wie eine Gridzelle sein. Innerhalb einer Gridzelle wird das Minimum der zugehörigen Toleranzen gebildet.

6.8 Vergleich der Verfahren

Zum Abschluss der theoretischen Diskussion möglicher Ansätze zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen werden in Tabelle 6.1 die vier eben diskutierten Verfahren gegenüber gestellt. Die Tabelle zeigt neben den besonderen Eigenschaften der Verfahren ihre Eignung für besondere Szenarien. Bei der Eignung werden drei Aspekte unterschieden: Anfragelast, Energiekosten und Bewegung der mobilen Objekte. Die Anfragelast ist in sechs wichtige Merkmale aufgeteilt: Ankunftsrate der diskreten Gebiets- und Gebietspositionsanfragen, Dichte der angefragten Gebiete kontinuierlicher Anfragen, Lebensdauer der kontinuierlichen Anfragen, Beweglichkeit der Anfragen, Länge der Beschreibung der angefragten Gebiete und Selektivität der Anfragen.

Räumliche und zeitliche Toleranz Wie bereits in Abschnitt 5.5 beschrieben, kann beim Tracking von mobilen Objekten mit räumlicher Toleranz deutlich mehr Energie gespart werden, als mit zeitlicher.

Die bei kontinuierlichen Positionsanfragen geführte Argumentation gilt ebenso bei kontinuierlichen Gebietspositionsanfragen.

Ob räumliche Toleranz der zeitlichen bei Gebietsanfragen überlegen ist, hängt davon ab, wie die Anfragen verarbeitet werden. Beim Grid-Verfahren berichten die mobilen Objekte ihre Position selbstständig, wie beim Tracking. Bei räumlicher Toleranz kann in aktiven Gridzellen ein Koppelnavigationsprotokoll verwendet werden, das deutlich weniger Positionsübermittlungen erfordert als das periodisch berichtende Protokoll, welches bei zeitlicher Toleranz verwendet werden muss. Bei SafeRegions, beim Auffordern zur Positionsbestimmung

	Auf-fordern	Safe-Regions	Anfragen Mitteilen	Grid-Ver-fahren
Wichtige Eigenschaften:				
Anfrageverarbeitung	zentral	hybrid	verteilt	hybrid
Minimale Zahl an Positionsbestimmungen	(✓)		✓	
Minimale Zahl an Positionsübermittlungen			✓	
Toleranzen vollständig genutzt	✓		✓	
Eignung, wenn ...				
viele diskrete Anfragen	✓			
angefragte Gebiete und Ränder sehr dicht liegen				✓
kontinuierliche Anfragen nur kurz leben	✓			
viele bewegliche kontinuierliche Anfragen	✓		✓	
angefragte Gebiete sehr komplexe Form haben	✓	✓		✓
Anfragen sehr selektiv sind	✓	✓	✓	
Positionsbestimmungen teuer	✓		✓	
Positionsübermittlungen teuer			✓	
Empfangkosten hoch				✓
Maximalgeschwindigkeit hoch		✓	✓	✓
Tatsächliche Geschwindigkeit hoch			✓	✓

Tabelle 6.1: Ansätze für Gebiets- und Gebietspositionsanfragen im Vergleich

und beim Mitteilen von Anfragen werden zeitliche und räumliche Toleranzen im Zusammenhang mit Gebietsanfragen ähnlich behandelt. Beiden Arten von Toleranz sind bezüglich des Energieverbrauchs gleich gut geeignet.

Bei beweglichen Anfragen muss die Bewegung des Parameterobjekts getrackt werden. In diesem Fall ist wiederum räumliche Toleranz der zeitlichen vorzuziehen.

7 Simulation

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse ausführlicher Simulationen zur Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen und zur Minimierung des Energieverbrauchs beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll und bei Koppelnavigationsprotokollen präsentiert. Vor der Diskussion konkreter Zahlen und Diagramme werden zunächst die Zielsetzung, die den Simulationen zu Grunde lag, und die Architektur der Simulationsumgebung erläutert.

7.1 Zielsetzung

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Aspekte energieschonenden Lokationsmanagements diskutiert. Boten sich für einen Aspekt mehrere Verfahren oder Ansätze an, so wurden diese, so weit wie möglich, theoretisch analysiert und bewertet.

Die hohe Komplexität energieschonenden Lokationsmanagements erfordert allerdings zusätzliche Analysen durch praktische Simulationen. Die vier wichtigsten zu untersuchenden Aspekte sind:

1. *Zahl der Positionsbestimmungen bei kontinuierlichen Gebietsanfragen:* In Abschnitt 6.1 wurde beschrieben, wie die minimale Zahl an Positionsbestimmungen bei der Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen erreicht werden kann.

   In Simulationen wurde diese Zahl bestimmt und mit der sonst üblichen konstanten Positionsbestimmungsrate verglichen, um einen Eindruck davon zu erhalten, wie viele Positionsbestimmungen, durch Anpassung an den tatsächlichen Informationsbedarf, eingespart werden können.

2. *Energieverbrauch berichtender Protokolle bei räumlicher Toleranz:* In Abschnitt 5.2 wurden Vorgehensweisen für das entfernungsbasiert berichtende Protokoll und für Koppelnavigationsprotokolle entwickelt, die die Zahl der Positionsbestimmungen minimieren oder eine Minimierung des Energieverbrauchs anstreben.

   In Simulationen wurden diese Vorgehensweisen erprobt und miteinander verglichen.

3. *Vergleich der Ansätze zur Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen:* In Kapitel 6 wurden mehrere Verfahren zur energieschonenden Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen dargestellt. Besonders wichtig und viel versprechend sind: Auffordern zur Positionsbestimmung, Anfragen Mitteilen und das Grid-Verfahren.

   In Simulationen wurden diese drei Verfahren bei verschiedenen Anfragelasten untersucht und bewertet.

4. *Zellgröße beim Grid-Verfahren:* In Kapitel 6 wurde erläutert, wie die Größe der Gridzellen die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen und die Zahl der Nachrichten vom Lokationsdienst beeinflusst.

   Dieser Einfluss wurde gemessen und untersucht und der Energieverbrauch, an Hand der Energiekosten und abhängig von der Größe der Gridzellen, bestimmt.

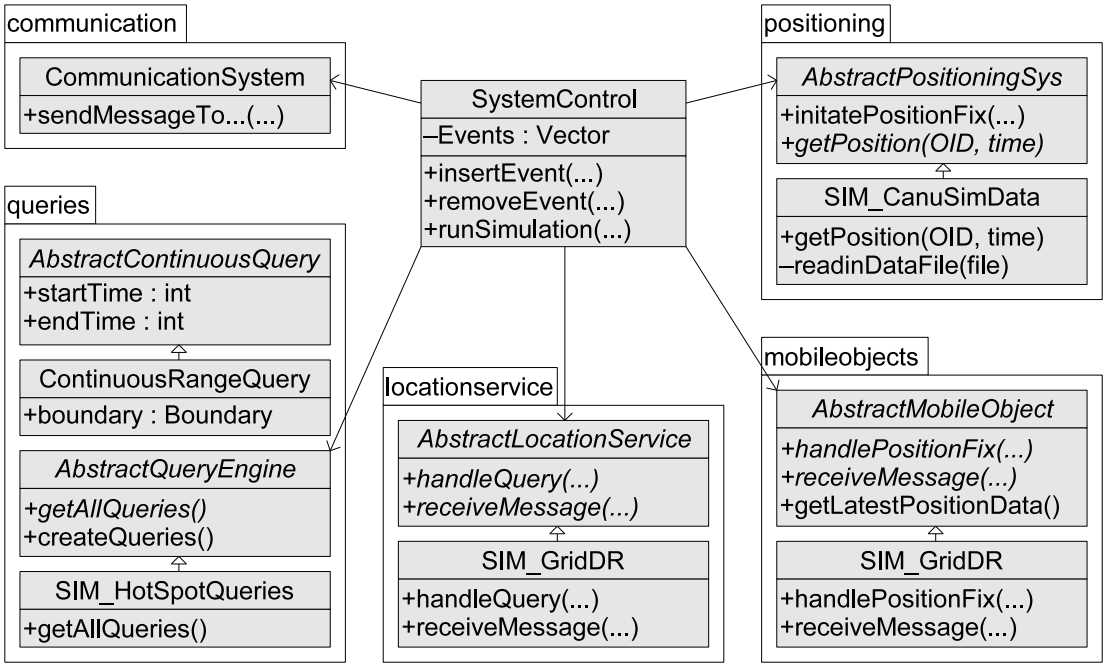


Abbildung 7.1: Architektur der Simulationsumgebung

7.2 Architektur der Simulationsumgebung

Zur Untersuchung der eben beschriebenen Aspekte wurde eine völlig neue Simulationsumgebung entwickelt und nur die Bewegung der mobilen Objekte mit vorhandener Software simuliert.

Besondere Herausforderung bei der Entwicklung war der zu simulierende Energieverbrauch, da dieser von sehr vielen Faktoren abhängt. Die Realität musste dazu möglichst genau abgebildet und notwendige Vereinfachungen so gewählt werden, dass sie die einzelnen Messwerte, aus denen sich der Energieverbrauch zusammensetzt, möglichst gering beeinflussen.

Die Simulationsumgebung verwendet ausschließlich diskrete Ereignissimulation. Alle Aktionen der mobilen Objekte und des Lokationsdienstes werden durch Ereignisse ausgelöst, die mit einem Zeitstempel versehen sind. Ein einzelner Thread verarbeitet diese Ereignisse der Reihe nach und führt die entsprechenden Algorithmen aus. Die Messwerte sind jederzeit reproduzierbar und unabhängig von Prozessorgeschwindigkeit und Speicherkapazität des simulierenden Rechners.

Die Simulationsumgebung ist in Java implementiert. Ihre Architektur gleicht dem Aufbau realer Lokationsmanagementsysteme. Kommunikationssystem, Positionsbestimmungssystem, Anfragen, Lokationsdienst und mobile Objekte werden jeweils durch separate Pakete repräsentiert. Die zentrale Klasse SystemControl verwaltet die Warteschlange, in der die Ereignisse nach ihren Zeitstempeln sortiert sind. Abbildung 7.1 zeigt die Architektur der Simulationsumgebung.

Parameter für einen Simulationslauf Ein Simulationslauf wird durch viele Parameter festgelegt, welche gemeinsam in einer XML-Datei spezifiziert werden. Die Hierarchie innerhalb der XML-Datei spiegelt die Architektur der Simulationsumgebung wider und ist offen für die

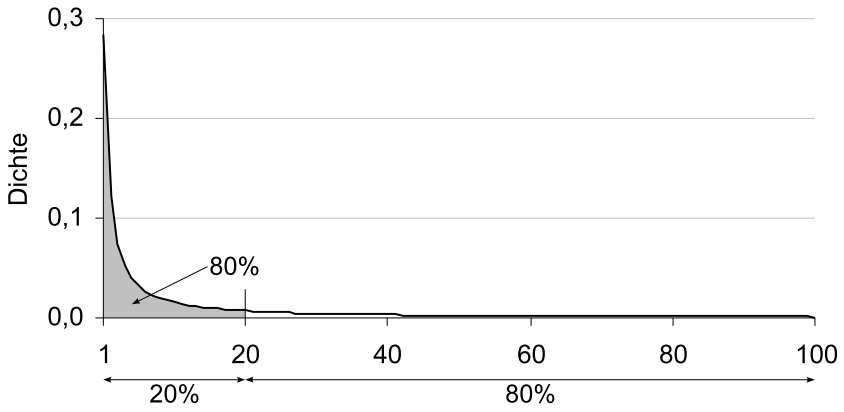


Abbildung 7.2: Dichtefunktion der Zipf-Verteilung

Parameter neuer Klassen und Pakete. In Anhang B.1 ist eine solche XML-Datei dargestellt.

Anfragemodell Die Simulationsumgebung unterstützt nur kontinuierliche Anfragen. Deren Lebensdauer wird exponential verteilt zufällig gewählt. Die durchschnittliche Lebensdauer ist als Parameter zu spezifizieren. Wird der Parameter nicht angegeben, so unterliegen die Anfragen keiner zeitlichen Begrenzung – sie sind dauerhaft.

Die Zahl der gleichzeitig gestellten Anfragen ist je Anfragetyp – Positions-, Gebiets-, und Gebietspositionsanfragen – während eines Simulationslaufes stets konstant und wird über getrennte Parameter angegeben. Endet eine kontinuierliche Anfrage, so beginnt sofort eine neue gleichen Typs. Der Vorgang wird aber durch zwei separate Ereignisse modelliert, als ob sie sich zu verschiedenen Zeitpunkten ereignen würden.

Die Anfragen erlauben stets eine räumliche Toleranz. Sie wird gleichverteilt zwischen zwei gegebenen Parametern gewählt. Das gleiche gilt für den Radius der angefragten Gebiete, die alle kreisförmig sind.

Während die mobilen Objekte von Positionsanfragen gleichverteilt zufällig angefragt werden, bilden die angefragten Gebiete so genannte „Hotspots“, das heißt Regionen, in denen sie besonders konzentriert liegen. Die Hotspots sind so gewählt, dass sie direkt an Straßen liegen. Belebte Straßen werden bevorzugt.

Für eine gewünschte Zahl von N Hotspots wählt die Simulationsumgebung $5N$ Positionen aus denen aller mobilen Objekte zu jedem möglichen Zeitpunkt gleichverteilt zufällig. Der Mittelpunkt jedes angefragten Gebiets liegt gleichverteilt zufällig auf einer kleinen Kreisscheibe um eine nach Zipf-Verteilung gewählten Position aus den $5N$ Positionen. Die Zipf-Verteilung wurde entsprechend dem Pareto-Prinzip, auch 80:20-Regel genannt, so parametrisiert, dass eine zufällig gewählte Position zu 80% eine der ersten N Positionen ist. Die anderen $4N$ Positionen werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 20% verwendet. Dadurch entstehen N Hotspots, wobei die ersten besonders häufig gewählt werden. Abbildung 7.2 zeigt die Dichtefunktion der Zipf-Verteilung mit einem auf 100 begrenzten Wertebereich und der angegebenen Parametrisierung.

Die Gebiets- und Gebietspositionsanfragen betreffen immer alle mobilen Objekte – Selektivität wird nicht unterstützt.

Mobile Objekte und Lokationsdienst Die mobilen Objekte und der Lokationsdienst werden durch Klassen repräsentiert, die jeweils eines der in Kapitel 6 genannten Verfahren zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen implementieren:

1. *Aufforderung zur Positionsbestimmung:* Der Lokationsdienst nimmt die Gebiets- und Gebietspositionsanfragen entgegen und fordert die mobilen Objekte bei Bedarf zur Positionsbestimmung auf. Die Position wird nach jeder Aufforderung an den Lokationsdienst übermittelt.

   Innerhalb des angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage wird, anders als oben beschrieben, nicht in ein berichtendes Protokoll gewechselt. Daher wird die Position auch innerhalb eines angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage nach jeder Positionsbestimmung sofort übermittelt. Dadurch ist die Zahl der Positionsbestimmungen noch etwas kleiner als die sonst minimale Zahl – die Zahl der Positionsübermittlungen und der Energieverbrauch jedoch höher.

   Da Gebietspositionsanfragen meist zusammen mit vielen Gebietsanfragen simuliert wurden, ist der Einfluss dieser Vereinfachung gering.

2. *Anfragen Mitteilen:* Die Verarbeitung der Gebiets- und Gebietspositionsanfragen erfolgt wie in Abschnitt 6.6 beschrieben. Wegen des kleinen Dienstgebiets wurde auf dessen Partitionierung in Zellen verzichtet.

   Da Gebietspositionsanfragen normalerweise zusammen mit vielen Gebietsanfragen simuliert wurden, konnte innerhalb des angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage auf ein Koppelnavigationsprotokoll verzichtet und statt dessen das entfernungsbasiert berichtende Protokoll verwendet werden. Bei diesem wird der Energieverbrauch für Positionsbestimmung und -übermittlung mit dem in Abschnitt 5.2 beschriebenen Vorgehen, in Abhängigkeit von der tatsächlichen Geschwindigkeit, minimiert.

   Zu Vergleichszwecken wurden auch die anderen in Abschnitt 5.2 beschriebenen Vorgehensweisen implementiert. Mehr dazu in Abschnitt 7.4.

3. *Grid-Verfahren:* Das Verfahren wurde wie oben beschrieben implementiert. Die Anzahl der Gridzellen kann in der Senkrechten und der Waagerechten beliebig eingestellt werden. In den nachfolgend beschriebenen Simulationen wurden möglichst quadratische Gridzellen verwendet. Der Lokationsdienst übermittelt den mobilen Objekten stets das Gridmuster des gesamten Dienstgebiets.

   Zur Positionsübermittlung wird das Koppelnavigationsprotokoll mit linearer Vorhersagefunktion verwendet. Die mobilen Objekte bestimmen nach jeder Positionsbestimmung ihren Geschwindigkeitsvektor aus den beiden zuletzt bestimmten Positionen. Bei Bedarf wird der Geschwindigkeitsvektor zusammen mit der zuletzt bestimmten Position übermittelt.

   Zur Minimierung des Energieverbrauchs wird das in Abschnitt 5.2 beschriebene Vorgehen verwendet, das die tatsächliche absolute Geschwindigkeit berücksichtigt.

   Andere Vorgehensweisen beim Koppelnavigationsprotokoll werden in Abschnitt 7.4 untersucht. Damit in diesem Zusammenhang auch das entfernungsbasiert berichtende Protokoll betrachtet werden konnte, wurde das Grid-Verfahren ein zweites Mal mit dem entfernungsbasiert berichtenden Protokoll implementiert.

Während einer Simulation ist die Zahl der mobilen Objekte konstant. Die mobilen Objekte sind immer verfügbar und befinden sich innerhalb des Dienstgebiets.

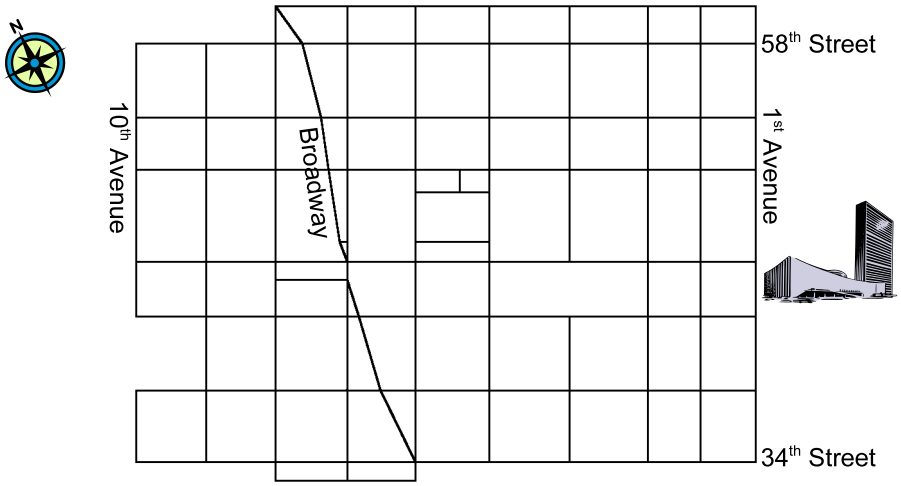


Abbildung 7.3: Im Mobilitätsmodell verwendete Straßen Midtown Manhattans

Mobilkommunikationssystem Der Lokationsdienst kann Nachrichten im Uni- oder Broadcast an die mobilen Objekte senden und die mobilen Objekte können Nachrichten an den Lokationsdienst senden. Nachrichten werden ohne Verzögerung zugestellt.

Zur Auswertung werden die verschiedenen Nachrichtentypen gezählt. Nachrichten während der Initialisierungsphase, zum Zeitpunkt 0, werden gesondert gewertet.

Positionsbestimmungssystem Das Positionsbestimmungssystem liefert exakte Positionsdaten. Die Dauer einer Positionsbestimmung ist konstant und wird über einen Parameter spezifiziert. In allen hier beschriebenen Simulationsläufen wurden 500 Millisekunden verwendet.

Mobilitätsmodell Die Bewegung der mobilen Objekte wurde mit Hilfe der Software CanuMobiSim [Canu] simuliert. Jedes mobile Objekt repräsentiert einen Passanten, der sich innerhalb des Dienstgebiets bewegt. Das Dienstgebiet ist ein knapp 4,5 Quadratkilometer großer Ausschnitt Midtown Manhattans mit den wichtigsten Straßen. Abbildung 7.3 zeigt den zugehörigen Graph.

Die mobilen Objekte starten auf gleichverteilt zufällig gewählten Kreuzungen. Anschließend wird für jedes mobile Objekt gleichverteilt zufällig eine weitere Kreuzung als Ziel und eine Geschwindigkeit aus einem gegebenen Intervall gewählt. In den Simulationen wurden – falls nicht anders angegeben – Geschwindigkeiten zwischen 0,83 und 1,94 Metern pro Sekunde verwendet, das heißt, drei bis sieben Stundenkilometern. Jedes mobile Objekt bewegt sich mit der gewählten Geschwindigkeit auf kürzestem Weg zu seiner Zielkreuzung. Dort angekommen, wählt es die nächste Zielkreuzung und die nächste Geschwindigkeit.

Zu beachten ist, dass die Durchschnittsgeschwindigkeit trotz Gleichverteilung kleiner ist, als der Mittelwert des Geschwindigkeitsintervalls – hier fünf Stundenkilometer beziehungsweise 1,39 Meter pro Sekunde. CanuMobiSim übervorteilt geringe Geschwindigkeiten, da die Geschwindigkeit nicht nach einer gewissen Zeit, sondern nach einer gewissen Entfernung, dem Abstand zur Zielkreuzung, geändert wird. Die tatsächliche Durchschnittsgeschwindigkeit beträgt 1,31 Meter pro Sekunde beziehungsweise 4,71 Stundenkilometer. Der Rechenweg findet sich in Anhang A.3.

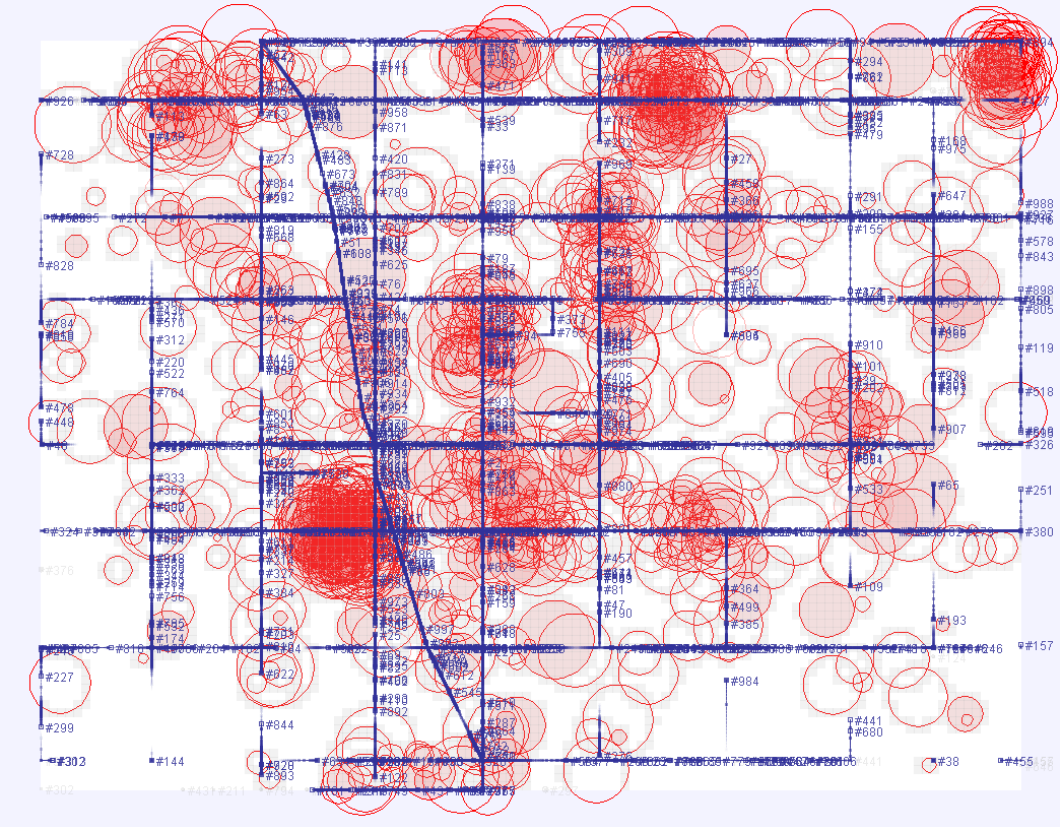


Abbildung 7.4: Screenshot während eines Simulationslaufes

Vor der Wahl einer neuen Zielkreuzung verweilen die mobilen Objekte gleichverteilt zufällig zwischen 0 und 120 Sekunden auf der eben erreichten Zielkreuzung. Wegen der auf Kreuzungen beschränkten Startplätze der mobilen Objekte wurde deren Bewegung zunächst jeweils 1000 Sekunden lang simuliert, bevor die eigentliche Simulationszeit begann. Dadurch waren die mobilen Objekte zum Beginn der eigentlichen Simulationszeit beliebig auf Knoten und Kanten des Graphs verteilt.

Graphische Darstellung Abbildung 7.4 zeigt einen Screenshot, der während eines Simulationslaufes entstanden ist. Die Darstellung zeigt das komplette Dienstgebiet.

Jeder Kreis stellt ein angefragtes Gebiet dar. Bei einer Gebietspositionsanfrage ist die Kreisfläche eingefärbt. Die Bildung der Hotspots ist deutlich zu erkennen.

Die aktuelle Position eines mobilen Objekts ist als kleines Quadrat dargestellt und rechts daneben ein Rautenzeichen gefolgt von der Objekt-ID. Die letzte Bewegung eines mobilen Objekts ist durch eine feine Linie dargestellt, die immer heller wird, bis sie im weißen Hintergrund verschwindet. Auf der Linie sind alle Positionen, an denen das mobile Objekt seine Position bestimmt hat, als kleines ausgefülltes Quadrat markiert. Je länger eine Positionsbestimmung zurück liegt, desto heller ist das zugehörige Quadrat. Ist die Positionsbestimmungsrate hoch, so bilden die vielen Quadrate eine dicke Linie.

Abbildung 7.4 ist bei einem Simulationslauf mit dem Grid-Verfahren entstanden. Die Gridzellen sind sehr klein, 20 auf 20 Meter. Aktive Gridzellen sind hellgrau dargestellt. Bewegt

Parameter	Belegung
Simulierte Zeitdauer *	3600 s
Anzahl mobiler Objekte *	1000
Größe des Dienstgebiets *	2431,01 m × 1843,24 m
Energiekostenverhältnis W_U/W_B	5,0
Maximalgeschwindigkeit *	2,78 m/s
Tatsächliche Geschwindigkeit	0,83 − 1,94 m/s
Pausen auf Zielkreuzungen	0 − 120 s
Dauer einer Positionsbestimmung *	0,5 s
Anzahl der Hotspots *	100
Kreisradius um Hotspot *	100 m

Tabelle 7.1: Typische Parameterbelegung in den Simulationsläufen

sich ein mobiles Objekt etwas abseits der anderen, so lässt sich in der Abbildung gut erkennen, wie die Positionsbestimmungsrate nach Verlassen eines Gebiets aktiver Zellen abgenommen und vor dem Betreten der nächsten aktiven Zelle wieder zugenommen hat.

Typische Parameterbelegung Falls nicht anders angegeben, wurden in den Simulationsläufen die in Tabelle 7.1 dargestellten Parameter verwendet. Die mit einem kleinen Stern markierten Parameter wurden in ausnahmslos allen Simulationsläufen identisch gewählt.

Mittelwertbildung bei den Simulationsergebnissen Alle im Folgenden präsentierten Zahlen und Diagramme beziehen sich auf ein einzelnes mobiles Objekt und eine simulierte Stunde. Es handelt sich stets um Mittelwerte von 1000 mobilen Objekten.

Normalerweise wurden zehn Messungen mit zwei verschiedenen Bewegungsmodellen und fünf Anfragemodellen gemittelt. Nur bei den in Abschnitt 7.4 diskutierten Simulationen wurde darauf verzichtet, da die Ergebnisse bei diesen Simulationsläufen nicht von der Lage der angefragten Gebiete abhängen.

7.3 Minimale Zahl an Positionsbestimmungen bei Gebietsanfragen

Zur Bestimmung der minimalen Zahl an Positionsbestimmungen bei Gebietsanfragen wurden dauerhafte Anfragen verwendet, die eine räumliche Toleranz zwischen 2,78 und 5,56 Metern erlaubten. Der Radius der angefragten Gebiete lag gleichverteilt zwischen zehn und 100 Metern.

Die Zahl der Positionsbestimmungen konnte minimiert werden, indem die mobilen Objekte vollständig über die Anfragen informiert wurden.

Aus der minimalen räumlichen Toleranz von 2,78 Metern und der Maximalgeschwindigkeit von 2,78 Metern pro Sekunde ergibt sich als minimaler Zeitabstand zwischen zwei Positionsbestimmungen eine Sekunde. Wäre periodische Positionsbestimmung verwendet worden,

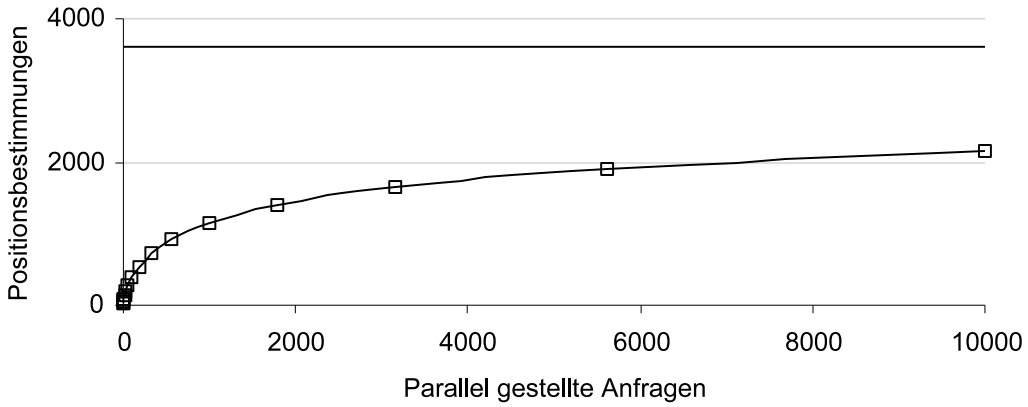


Abbildung 7.5: Anzahl der Positionsbestimmungen bei dauerhaften Gebietsanfragen

so hätte als Positionsbestimmungsrate mindestens ein Hertz verwendet werden müssen, um allen räumlichen Toleranzen genügen zu können.

Abbildung 7.5 zeigt, abhängig von der Zahl der Gebietsanfragen, wie oft ein mobiles Objekt seine Position in der simulierten Stunde bestimmt hat.

Zunächst steigt die Zahl der Positionsbestimmungen mit der Zahl der Anfragen stark an, da ein einzelnes angefragtes Gebiet auch Positionsbestimmungen von mobilen Objekten erfordert, die es nicht betreten, sondern sich nur daran vorbei bewegen.

Je größer die Zahl der Anfragen ist, desto geringer wächst die Zahl der Positionsbestimmungen, da die angefragten Gebiete bereits so dicht liegen, dass neue angefragte Gebiete meistens weiter von den mobilen Objekten entfernt sind, als die vorhandenen.

Erstaunlich ist, dass selbst bei 10000 Gebietsanfragen nicht etwa rund 3600 sondern nur knapp 2150 Positionsbestimmungen benötigt werden – immerhin beträgt die Gesamtlänge der Ränder bei 10000 kreisförmigen angefragten Gebieten etwa 3500 Kilometer:

$$10000 \cdot 2\pi \frac{10\,\mathrm{m} + 100\,\mathrm{m}}{2} = 3\,455\,752\,\mathrm{m}$$

Die Simulation zeigt deutlich, dass durch Anpassung der Zahl der Positionsbestimmungen an den tatsächlichen Bedarf erheblich Energie gespart werden kann und dass sich die Anpassung auch bei sehr hohen Anfragelasten auszahlen kann.

7.4 Energieverbrauch berichtender Protokolle bei räumlicher Toleranz

Wie in Abschnitt 5.4 ausführlich erläutert, gibt es beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll und bei Koppelnavigationsprotokollen verschiedene Vorgehensweisen, wann die Position übermittelt und wie oft sie bestimmt wird. Zwei davon wurden im Rahmen dieser Arbeit mit dem Ziel entwickelt, den Energieverbrauch zu minimieren. Im Folgenden sind die verschiedenen Vorgehensweisen mit Abkürzungen benannt:

- *PÜmin:* Das mobile Objekt übermittelt seine Position erst, wenn es den Toleranzkreis binnen der nächsten Positionsbestimmung zu verlassen droht. Dadurch wird die Zahl der Positionsübermittlungen minimiert. Der Energieverbrauch ist in der Regel nicht minimal, da nahe dem Rand des Toleranzkreises sehr viele Positionsbestimmungen benötigt werden.

- *PBmin:* Die Position wird jedes Mal übermittelt, wenn sich das mobile Objekt von der zuletzt übermittelten Position entfernt hat – egal wie gering die Entfernung ist. Dadurch beträgt die Zeitspanne zwischen zwei Positionsbestimmungen stets $d_A/\hat{v}_{\mathrm{OID}}$. Die Zahl der Positionsbestimmungen ist minimal – die Zahl der Positionsübermittlungen dafür sehr hoch. Das mobile Objekt verbraucht viel Energie durch die häufigen Positionsübermittlungen.

- *EminF:* Die Position wird übermittelt, sobald das mobile Objekt nach einer neuerlichen Positionsbestimmung feststellt, dass sein Abstand zum Rand des Toleranzkreises kleiner als
$$\frac{d_A}{\frac{W_U}{W_B}+1}$$
ist. Dieses Vorgehen strebt eine Minimierung des Energieverbrauchs an, indem es die Zahl der Positionsbestimmungen gegenüber der Zahl der Positionsübermittlungen, abhängig vom Energiekostenverhältnis W_U/W_B, abwägt.

- *EminV:* Die Position wird übermittelt, sobald das mobile Objekt nach einer neuerlichen Positionsbestimmung feststellt, dass sein Abstand zum Rand des Toleranzkreises kleiner als
$$d_A - vT_{0,i'}$$
ist. i' und $T_{0,i'}$ ergeben sich aus der minimalen Leistungsaufnahme $\overline{P}_{\mathrm{OID}}(i')$ bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit v. In der hier verwendeten Implementierung wird v aus dem räumlichen und zeitlichen Abstand der beiden zuletzt bestimmten Positionen ermittelt.

  Auch dieses Vorgehen strebt eine Minimierung des Energieverbrauchs an und ist dem zuvor genannten Vorgehen bei kleinen tatsächlichen Geschwindigkeiten überlegen, wie in Abschnitt 5.4 diskutiert.

  Bei Koppelnavigationsprotokollen wird zwischen *EminVabs* und *EminVrel* unterschieden. Beim ersten Vorgehen wird für v die absolute Geschwindigkeit, beim zweiten die Geschwindigkeit relativ zur vermuteten Bewegung verwendet.

Zur Simulation der verschiedenen Vorgehensweisen wurden die beiden implementierten Varianten des Grid-Verfahrens – mit dem entfernungsbasiert berichtenden Protokoll und mit dem Koppelnavigationsprotokoll – verwendet. Zur Simulation wurde eine einzelne aktive Gridzelle in der Größe des Dienstgebiets verwendet, so dass alle mobilen Objekte ihre Position ständig berichten mussten.

Wenn nicht anders angegeben, so erlaubte die aktive Gridzelle eine räumliche Toleranz von 25 Metern. Wenn nicht anders genannt, bewegten sich die mobilen Objekte 0,83 bis 1,94 Meter pro Sekunde.

Entfernungsbasiert berichtendes Protokoll Zunächst werden die verschiedenen Vorgehensweisen beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll miteinander verglichen.

Abbildung 7.6 zeigt den Energieverbrauch eines mobilen Objekts in Abhängigkeit des Energiekostenverhältnisses W_U/W_B. Da der Energieverbrauch mit dem Energiekostenverhältnis stark anwächst, erfolgt die Darstellung relativ zum Energieverbrauch des ursprünglichen Vorgehens PÜmin.

Das Diagramm zeigt, dass mit den beiden neu entwickelten Vorgehen EminF und EminV stets weniger Energie verbraucht wird, als bei Verwendung von PÜmin oder PBmin.

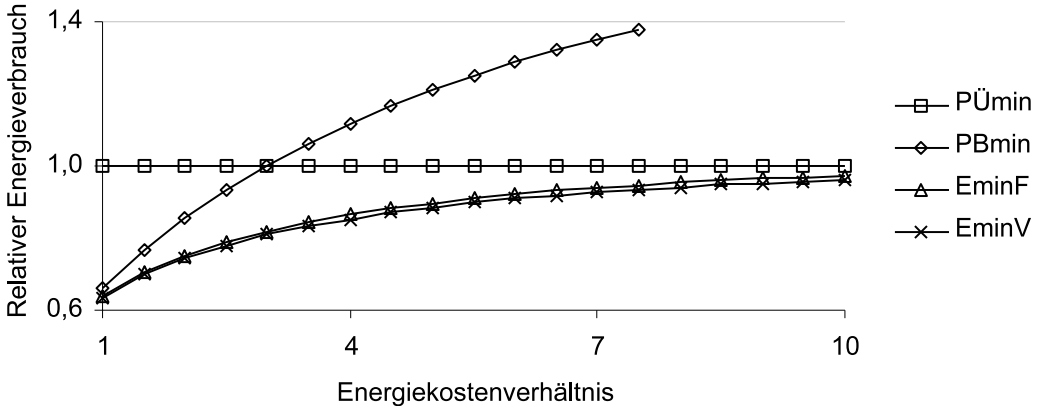


Abbildung 7.6: Entfernungsbasierte Positionsübermittlung nach Energiekostenverhältnis

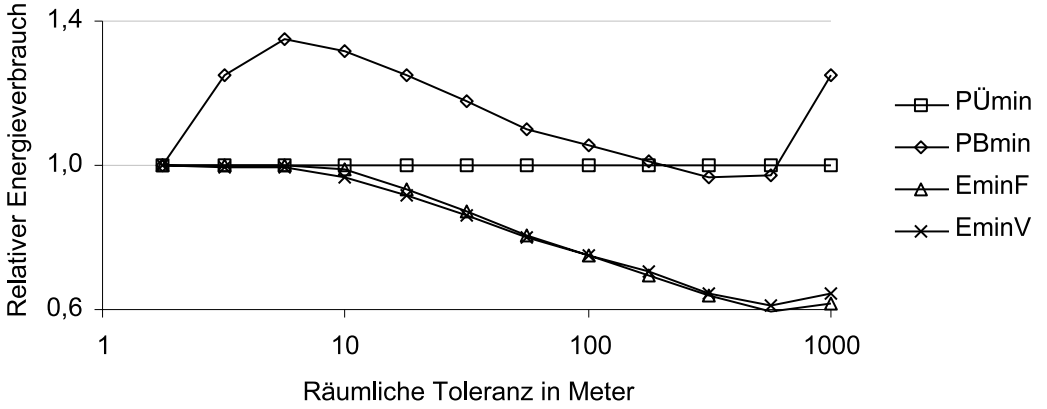


Abbildung 7.7: Entfernungsbasierte Positionsübermittlung nach Toleranz

Der Unterschied zwischen EminF und EminV selbst ist relativ gering – die Berücksichtigung der tatsächlichen Geschwindigkeit durch EminV reduziert den Energieverbrauch bei dem gegebenen Geschwindigkeitsintervall um weitere ein bis zwei Prozentpunkte.

Abbildung 7.7 zeigt: Je größer die Toleranz, desto mehr Energie sparen EminF oder EminV gegenüber dem üblichen PÜmin. Als Energiekostenverhältnis wurde bei diesen Simulationen stets $W_U/W_B = 5{,}0$ verwendet.

Bei sehr geringer räumlicher Toleranz ist der Energieverbrauch unabhängig vom Vorgehen. Die mobilen Objekte nähern sich dem Rand ihres Toleranzkreises sehr rasch und müssen ihre Position nach jeder Positionsbestimmung übermitteln, damit sie den Toleranzkreis während der nächsten Positionsbestimmung nicht verlassen.

Ist der Toleranzkreis sehr groß, so verbraucht PBmin weniger Energie als PÜmin. Was zunächst verwunderlich scheint, lässt sich leicht erklären: Bei großer räumlicher Toleranz bewegen sich die mobilen Objekte normalerweise nicht einmal annähernd geradlinig, sondern in vielen Kurven auf den Rand des Toleranzkreises zu. Oft bewegen sie sich über längere Zeit relativ dicht vor dem Rand des Toleranzkreises, ohne diesen zu verlassen. Relativ dicht ist hier in Anbetracht der großen Toleranz zu sehen. Entsprechend müssen sie bei PÜmin ihre Position relativ oft bestimmen. Wird die Position nach jeder Positionsbestimmung übermittelt, wie

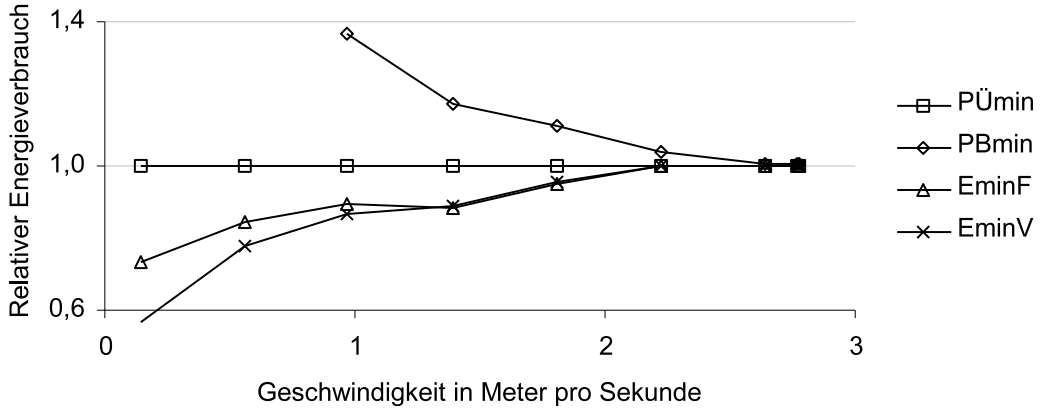


Abbildung 7.8: Entfernungsbasierte Positionsübermittlung nach Geschwindigkeit

bei PBmin, so wird in der Summe weniger Energie verbraucht.

Für den ungewöhnlichen Anstieg der Kurven bei einer räumlichen Toleranz von 1000 Metern ist das relativ kleine Dienstgebiet verantwortlich. Der Toleranzkreis ist fast so groß wie das Dienstgebiet. Da sich die mobilen Objekte nur innerhalb des Dienstgebiets bewegen, können sie den Rand des Toleranzkreises an vielen Stellen gar nicht überschreiten. Diese Eigenheit der Simulation wird von EminF und EminV nicht berücksichtigt. Ein mobiles Objekt übermittelt seine Position auch dann, wenn es sich dem Rand des Toleranzkreises, von seiner jetzigen Position aus, nicht weiter nähern kann. Anders PÜmin – hat ein mobiles Objekt einmal eine Position aus der Mitte des Dienstgebiets übermittelt, so erfolgt eine erneute Positionsübermittlung nur, wenn es sich dicht vor den linken oder rechten Rand des Dienstgebiets bewegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass es sich dorthin bewegt, ist gering.

Abbildung 7.8 zeigt, dass EminV der Vorgehensweise EminF vor allem bei geringer Geschwindigkeit deutlich überlegen ist. Bei den zugehörigen Simulationsläufen bewegten sich die mobilen Objekte nicht nur mit jeweils konstanter Geschwindigkeit, sondern legten auf den Zielkreuzungen auch keine Pausen ein.

Das Diagramm zeigt, dass Geschwindigkeiten kleiner $\hat{v}_{\mathrm{OID}}/3$ auf jeden Fall explizit behandelt werden sollten, wie bei EminV. In den Simulationen verbrauchten die mobilen Objekte bei Verwendung von EminV und einer Geschwindigkeit von 0,14 Metern pro Sekunde nur knapp 80% der Energie, die sie bei EminF verbrauchten.

Da EminF auch sonst meistens etwas mehr oder nur unmerklich weniger Energie verbraucht, ist EminV generell vorzuziehen.

Abbildung 7.9 zeigt, dass der Energieverbrauch bei EminV durch Verwendung von $r_{i'-0,5}$ tatsächlich minimiert wird. Das Diagramm ist aus Simulationen entstanden, bei denen bei der Berechung von $r_{i'-0,5}$ zu $i'-0,5$ bewusst ein Fehler zwischen $-3,2$ und 3,2 zu i' hinzu addiert wurde. Die mobilen Objekte hatten stets eine größere Leistungsaufnahme, egal wie groß der Fehler gewählt wurde. Die drei Kurven des Diagramms sind aus Simulationen mit unterschiedlichen Energiekostenverhältnissen W_U/W_B, nämlich 1, 5 und 10, entstanden.

Bei $W_U/W_B = 1$ wächst der Energieverbrauch ab einem Fehlern kleiner $-0,8$ nicht weiter an, da bereits $i'-0,5-0,8<0$ ist und in diesem Fall $r_{i'-0,5-0,8} = d_A$ verwendet wurde.

Koppelnavigationsprotokolle Nun werden die Vorgehensweisen beim Koppelnavigationsprotokoll mit linearer Vorhersagefunktion verglichen.

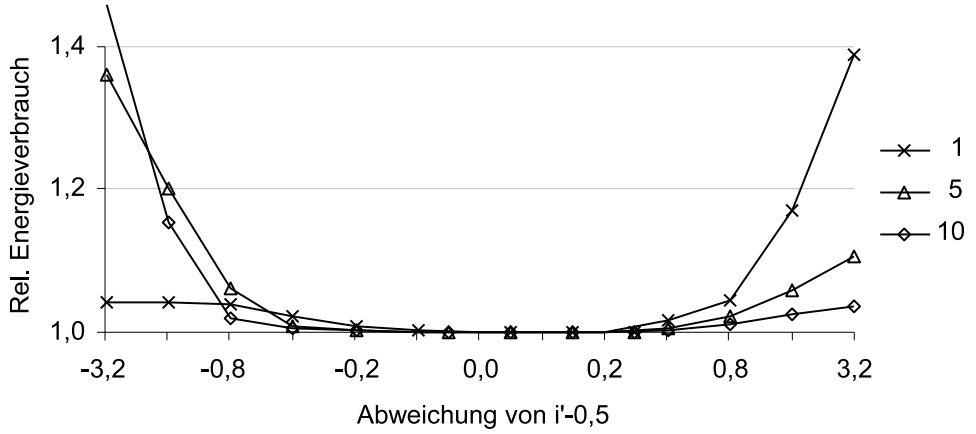


Abbildung 7.9: Entfernungsbasierte Positionsübermittlung abhängig von $i' - 0{,}5$

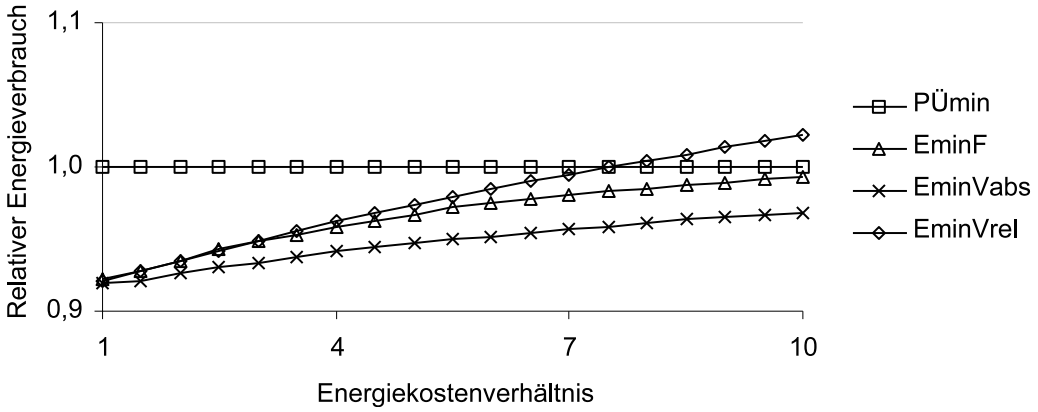


Abbildung 7.10: Koppelnavigation nach Energiekostenverhältnis

In den Diagrammen ist die Leistungsaufnahme bei Verwendung von PBmin nicht eingezeichnet, da sie bei Koppelnavigationsprotokollen deutlich höher ist als bei allen anderen Vorgehen.

Abbildung 7.10 zeigt den Energieverbrauch in Abhängigkeit des Energiekostenverhältnisses W_U/W_B. Wie die Skalierung der senkrechten Achse zeigt, wird der Energieverbrauch durch Verwendung von EminF oder EminV gegenüber der ursprünglichen Vorgehensweise PÜmin nur mäßig reduziert. Trotzdem ist wiederum EminV dem Vorgehen EminF sichtbar überlegen, wenn bei EminV die absolute und nicht die relative Geschwindigkeit verwendet wird.

Abbildung 7.11 zeigt den Energieverbrauch bei den verschiedenen Vorgehensweisen in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit. Wiederum zeigt sich, dass EminVabs dem Vorgehen EminF normalerweise überlegen ist. Eine Ausnahme bildet jene Geschwindigkeit, bei der

$$r_{i'-0,5} = \frac{d_A}{\frac{W_U}{W_B} + 1}$$

ist. In diesem Fall ist der Energieverbrauch gleich. Bei den vorliegenden Simulationsergebnissen wird dieser Punkt ungefähr bei $v = 2{,}2\,\mathrm{m/s}$ erreicht.

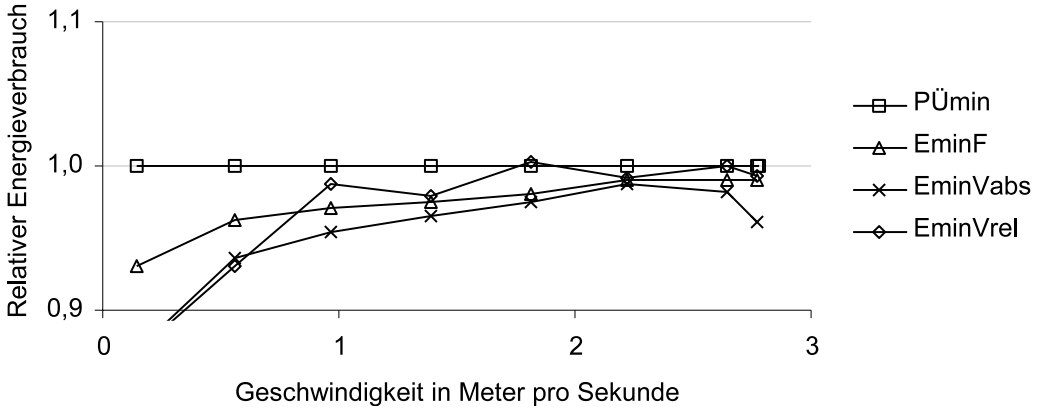


Abbildung 7.11: Koppelnavigation nach Geschwindigkeit

Normalerweise ist die relative Geschwindigkeit eines mobilen Objekts sehr klein und daher $r_{i'-0,5} \approx d_A$. Nach einem Abbiegevorgang übermittelt das mobile Objekt seine Position sofort nach der nächsten Positionsbestimmung. Als Vorhersagefunktion wird gleichzeitig der Geschwindigkeitsvektor zwischen den beiden zuletzt bestimmten Positionen übermittelt, der normalerweise schräg zur neuen Bewegungsrichtung liegt. Nach kurzer Zeit muss eine weitere Positionsübermittlung folgen.

Bei EminVabs ist $r_{i'-0,5}$ normalerweise deutlich kleiner als d_A. Nach einem Abbiegevorgang wird die Position oft zwei- oder dreimal bestimmt, bevor sie übermittelt wird. Der ebenfalls übermittelte Geschwindigkeitsvektor ist parallel zur neuen Bewegungsrichtung. Die Position wird zunächst kein weiteres Mal übermittelt.

Aus diesem Grund verbrauchen die mobilen Objekte bei Verwendung von EminVabs oft deutlich weniger Energie bei EminVrel.

Wären in den Simulationen nicht die geraden Straßen Manhattans, sondern kurvige Straßen verwendet worden, so hätte EminVrel noch schlechter gegenüber EminVabs abgeschnitten. Daher ist EminVabs dem Vorgehen EminVrel bei linearen Vorhersagefunktionen stets vorzuziehen.

Für die starken Schwankungen des Energieverbrauchs bei EminVrel in Abbildung 7.11 ist – neben dem problematischen Verhalten bei Abbiegevorgängen – die Fließkommagenauigkeit des Rechners verantwortlich, auf dem die Simulationen durchgeführt wurden. Teilweise wurden sehr kleine relative Geschwindigkeiten größer null unerwünscht auf null abgerundet.

7.5 Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen

Zum Vergleich der drei Verfahren Anfragen Mitteilen, Auffordern zur Positionsübermittlung und dem Grid-Verfahren wurden diese bei verschiedenen Anfragelasten simuliert. Das Grid-Verfahren wurde mit quadratischen Gridzellen mit 80 und 300 Metern Seitenlänge simuliert.

Die Zahl der parallel gestellten Gebiets- und Gebietspositionsanfragen wurde zwischen eins und 1000 variiert. 80% der Anfragen waren Gebietsanfragen und 20% Gebietspositionsanfragen.

In den ersten Simulationen wurden langlebige Anfragen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 60 Minuten verwendet, in den zweiten Simulationen kurzlebige Anfragen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 15 Minuten.

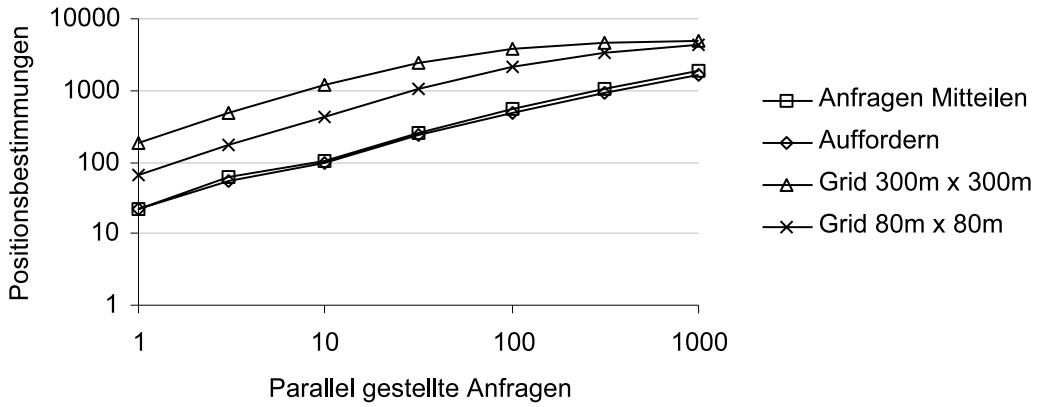


Abbildung 7.12: Anzahl der Positionsbestimmungen bei langlebigen Anfragen

Alle anderen Parameter wurden stets gleich gewählt. Der Radius der angefragten Gebiete lag zwischen zehn und 100 Metern und die erlaubte Toleranz gleichverteilt zwischen 2,78 und 5,56 Metern. Alle weiteren Parameter wurden wie in Tabelle 7.1 angegeben gewählt.

In allen Diagrammen ist in der Waagerechten die Zahl der parallel gestellten Anfragen aufgetragen.

Langlebige Anfragen Abbildung 7.12 zeigt, wie oft ein mobiles Objekt seine Position innerhalb der simulierten Stunde durchschnittlich bestimmt hat. Die Zahl der Positionsbestimmungen ist beim Anfragen Mitteilen und Auffordern zur Positionsübermittlung am kleinsten. Bei Auffordern zur Positionsübermittlung ist sie sogar etwas kleiner, da die Position bei der hier verwendeten Implementierung nach jeder Positionsbestimmung sofort übermittelt wird.

Je größer die Gridzellen, desto größer die Zahl der Positionsbestimmungen. Bei vielen parallel gestellten Anfragen wird der Unterschied allerdings geringer, da fast alle Gridzellen, unabhängig von der Größe, aktiviert sind.

Bei der Anzahl der Positionsübermittlungen, in Abbildung 7.13 dargestellt, ist das Grid-Verfahren den anderen schon bei geringer Anfragelast überlegen. Bei 1000 parallel gestellten Anfragen fallen beim Auffordern zur Positionsübermittlung nur doppelt so viele Positionsübermittlungen an, wie beim Mitteilen von Anfragen, konkret 1600 Positionsübermittlungen zu 800.

Der lokale Hochpunkt bei drei parallel gestellten Anfragen beim Anfragen Mitteilen ist etwas ungewöhnlich. Verantwortlich ist einer der hier gemittelten zehn Simulationsläufe, bei dem die mobilen Objekte ihre Position statt durchschnittlich 7,7-mal rund 54-mal übermittelt haben.

Abbildung 7.14 zeigt die Zahl der Nachrichten, die ein mobiles Objekt innerhalb der simulierten Stunde vom Lokationsdienst empfangen hat. Beim Grid-Verfahren mit großen Gridzellen ist sehr schön zu sehen, ab wann ein gewisser Grenzwert erreicht ist. Bei höherer Anfragelast sind weitere Anfragen irrelevant, da sowieso schon alle Gridzellen aktiviert sind. Bei 1000 parallel gestellten Anfragen ist die Zahl der Nachrichten kleiner, wenn die mobilen Objekte zu jeder Positionsbestimmung und -übermittlung aufgefordert werden, als wenn ihnen die Anfragen komplett mitgeteilt werden.

Zur Berechnung des Energieverbrauchs eines mobilen Objekts sind die eben genannten

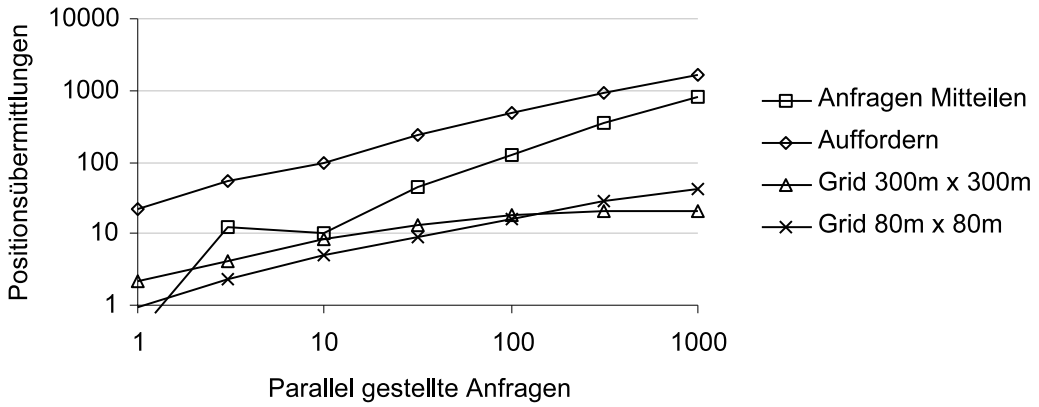


Abbildung 7.13: Anzahl der Positionsübermittlungen bei langlebigen Anfragen

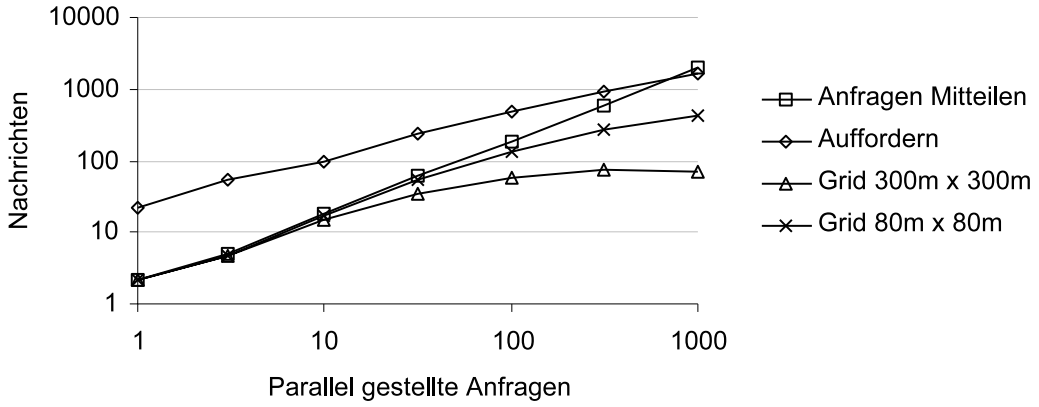


Abbildung 7.14: Anzahl der Nachrichten bei langlebigen Anfragen

Messwerte zu gewichten. Die verschiedenen Energiekosten wurden wie folgt gewählt: Eine Positionsbestimmung verbraucht 0,04 Joule, eine Positionsübermittlung 0,2 Joule, der Empfang einer Aufforderung 0,1 Joule, der Empfang einer Anfrage 0,2 Joule, der Empfang eines neuen Gridmusters bei Gridzellen mit 300 Metern Seitenlänge verbraucht 0,1 Joule und bei 80 Metern Seitenlänge 0,3 Joule. Die Energiekosten orientieren sich grob an GSM.

Abbildung 7.15 zeigt den Energieverbrauch eines mobilen Objekts in Abhängigkeit von der Zahl der parallel gestellten Anfragen.

Bei geringer Anfragelast verbrauchen die mobilen Objekte am wenigsten Energie, wenn sie vollständig über die Anfragen informiert werden. Bei hoher Anfragelast zeigen sich die Stärken des Grid-Verfahrens: Bei 1000 parallel gestellten Anfragen verbraucht ein mobiles Objekt durchschnittlich 631 Joule, wenn es vollständig über die Anfragen informiert wird, beim Grid-Verfahren und Gridzellen mit 300 Metern Seitenlänge hingegen nur 212 Joule.

Die gestrichelte Linie deutet den Energieverbrauch bei ständiger Positionsbestimmung an – bei diesen Parametern 7200 Positionsbestimmungen pro Stunde. Die oben entwickelten Verfahren reduzieren den Energieverbrauch bei zehn parallel gestellten Anfragen um über 95%.

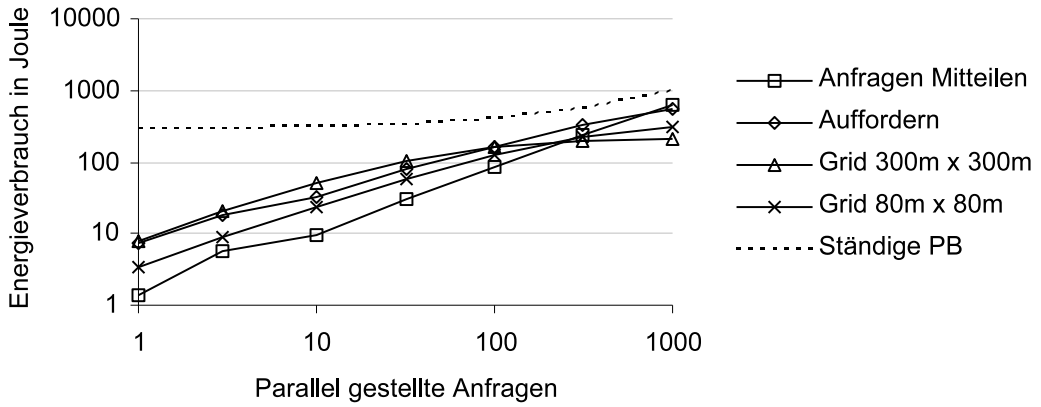


Abbildung 7.15: Energieverbrauch der mobilen Objekte bei langlebigen Anfragen

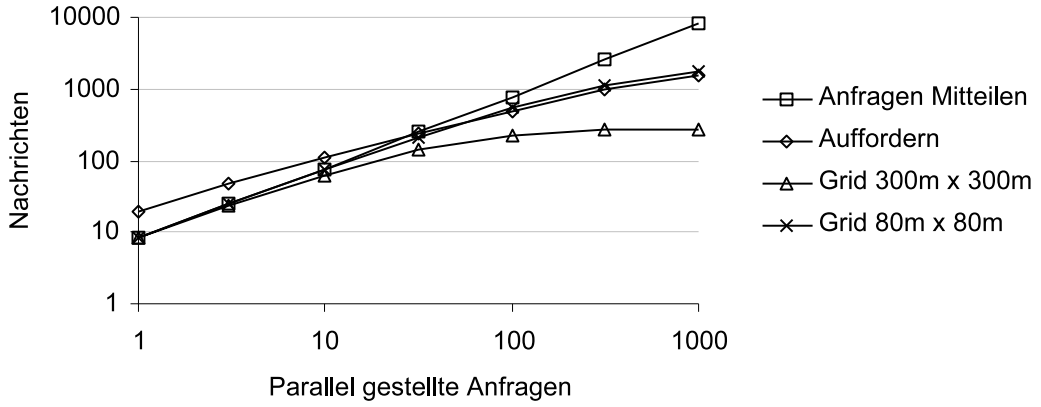


Abbildung 7.16: Anzahl der Nachrichten bei kurzlebigen Anfragen

Kurzlebige Anfragen Bei kürzerer Lebensdauer der kontinuierlichen Anfragen – hier 15 Minuten – nimmt der Energieverbrauch der mobilen Objekte zu. Zwar gleichen die Zahl der Positionsbestimmungen und die Zahl der Positionsübermittlungen denen bei langlebigen Anfragen, doch müssen die mobilen Objekte normalerweise deutlich mehr Nachrichten vom Lokationsdienst entgegen nehmen.

Beim Anfragen Mitteilen und auch beim Grid-Verfahren ist die Zahl der Nachrichten ziemlich genau viermal so hoch, wie bei Anfragen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 60 Minuten. Hier zeigt sich die Stärke des Aufforderns zur Positionsübermittlung. Die Zahl der Nachrichten bleibt dieselbe, wie Abbildung 7.16 im Vergleich mit Abbildung 7.14 zeigt.

Abbildung 7.17 stellt den Energieverbrauch der mobilen Objekte dar. Bei sehr hoher Anfragelast ist Auffordern zur Positionsübermittlung sogar etwas energieschonender als das Grid-Verfahren bei Verwendung kleiner Gridzellen.

Andere Anfragelasten In Anhang B.3 finden sich die Ergebnisse ähnlicher Simulationen, bei denen 20% der Anfragen Gebietsanfragen und 80% Gebietspositionsanfragen waren.

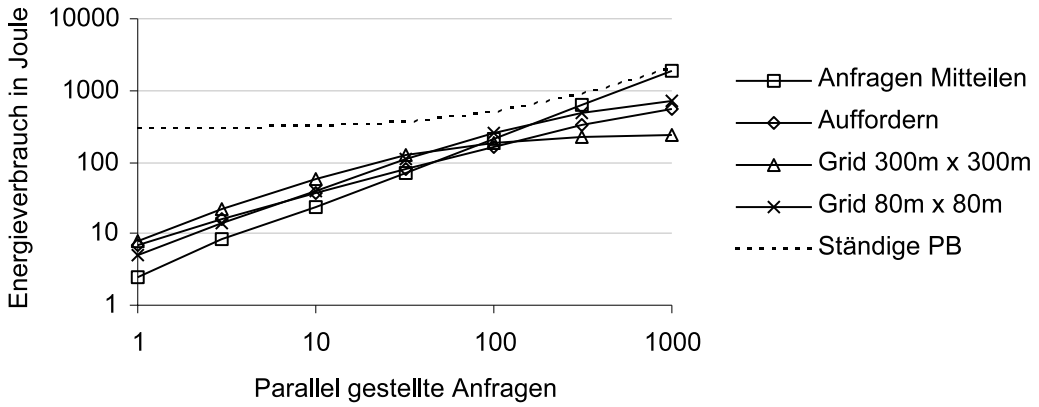


Abbildung 7.17: Energieverbrauch der mobilen Objekte bei kurzlebigen Anfragen

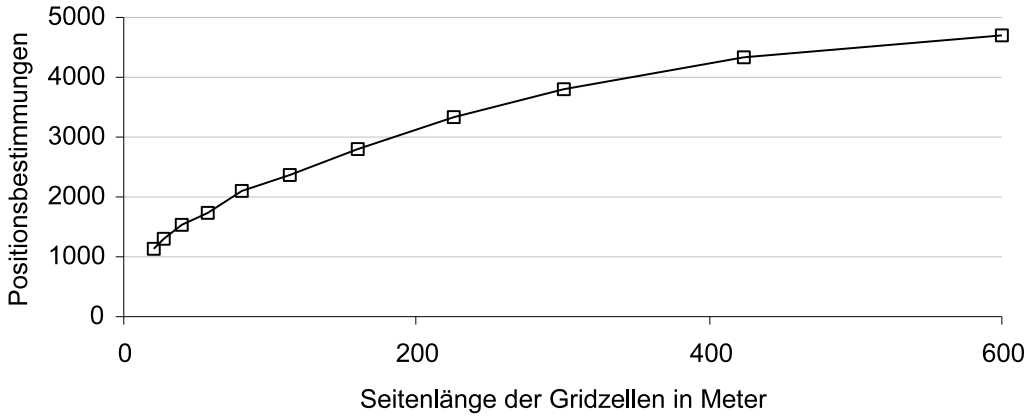


Abbildung 7.18: Anzahl der Positionsbestimmungen bei Grid-Verfahren

7.6 Minimaler Energieverbrauch beim Grid-Verfahren

Beim Grid-Verfahren kann die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen gegenüber der Zahl und Länge der zu empfangenden Nachrichten abgewogen werden. Abhängig von der Anfragelast, ist der Energieverbrauch bei einer gewissen Gridzellengröße minimal.

Die im Folgenden beschriebenen Diagramme sind aus Simulationen mit jeweils 80 parallel gestellten Gebietsanfragen und 20 Gebietspositionsanfragen entstanden. Der Radius der angefragten Gebiete wurde gleichverteilt zwischen 10 und 100 Metern gewählt. Die Anfragen erlaubten jeweils eine Toleranz zwischen 2,78 und 5,56 Metern.

Anzahl der Positionsbestimmungen Abbildung 7.18 zeigt, wie oft ein mobiles Objekt seine Position, binnen der simulierten Stunde, durchschnittlich bestimmt hat. In der Waagerechten ist die Seitenlänge der Gridzellen aufgetragen.

Wie zu erwarten, steigt die Zahl der Positionsbestimmungen mit der Seitenlänge der Gridzellen. Zum einen wächst die Fläche des Dienstgebiets, die von aktiven Gridzellen bedeckt ist, zum anderen erlauben größere Gridzellen oft nur eine geringe Toleranz, da die Gridzellen von vielen Anfragen gleichzeitig aktiviert werden und jeweils die minimale Toleranz verwendet

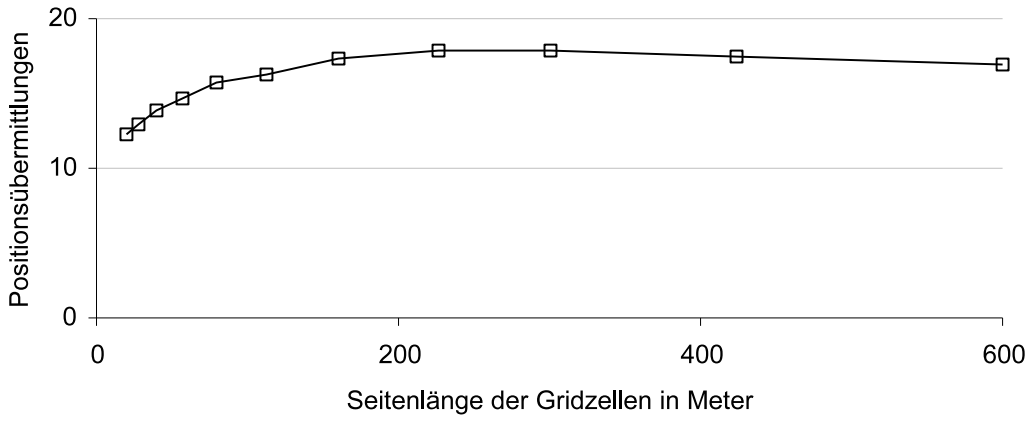


Abbildung 7.19: Anzahl der Positionsübermittlungen bei Grid-Verfahren

werden muss.

Anzahl der Positionsübermittlungen Ein ähnliches Bild ergibt sich bei der Zahl der Positionsübermittlungen, wie in Abbildung 7.19 zu sehen. Je kleiner die Gridzellen, desto größer sind die Gebiete passiver Gridzellen, in denen sich die mobilen Objekte bewegen können, ohne ihre Position übermitteln zu müssen.

In einem Ausnahmefall muss ein mobiles Objekt auch in passiven Gridzellen seine Position übermitteln – und dieser Fall ist der Grund dafür, dass die Zahl der Positionsübermittlungen ihr Maximum nicht bei einer Seitenlänge von 600 Metern erreicht, sondern bereits bei 300 Metern.

Wie in Abschnitt 6.7 beschrieben, kann bei Verwendung eines Koppelnavigationsprotokolls teilweise auf die Positionsübermittlung beim Wechsel von einer passiven in eine aktive Gridzelle verzichtet werden. Voraussetzung ist, dass die Vorhersagefunktion auch bei Bewegung in passiven Zellen korrigiert wird, sobald die vorhergesagte Bewegung fälschlicherweise in eine aktive Zelle führt.

Die Simulationsumgebung verwendet den aus den beiden letzten Positionsbestimmungen resultierenden Geschwindigkeitsvektor als Vorhersagefunktion. Da in passiven Gridzellen die Position nur selten bestimmt wird, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass der Geschwindigkeitsvektor aus einer Positionsbestimmung vor dem Abbiegen an einer Kreuzung und einer danach ermittelt wird. Als Vorhersagefunktion taugt er nicht, da er schräg zur tatsächlichen Bewegungsrichtung des mobilen Objekts steht.

So kann es passieren, dass ein mobiles Objekt seine Position zunächst übermitteln muss, weil es abgebogen ist und die ursprünglich vorhergesagte Bewegung fälschlicherweise in eine aktive Gridzelle führt und dann, weil der eben übermittelte Geschwindigkeitsvektor tatsächliches Betreten einer aktiven Gridzelle nicht korrekt vorhersagt. Dieser Fall tritt besonders häufig ein, wenn eine einzelne passive Gridzelle von aktiven Gridzellen umringt ist.

Werden die Gridzellen vergrößert, so werden solche vereinzelten passiven Gridzellen Teil einer aktiven Gridzelle. Da die Position in einer aktiven Gridzelle viel häufiger bestimmt wird, werden nach dem Abbiegen meist zwei oder mehr Positionsbestimmungen vorgenommen, bevor die Position zusammen mit dem Geschwindigkeitsvektor übertragen wird. Der Geschwindigkeitsvektor ist parallel zur tatsächlichen Bewegung und damit als Vorhersagefunktion gut geeignet. Eine erneute Positionsübermittlung, wie im Fall der passiven Gridzelle,

Abbildung 7.20: Anzahl der Nachrichten bei Grid-Verfahren

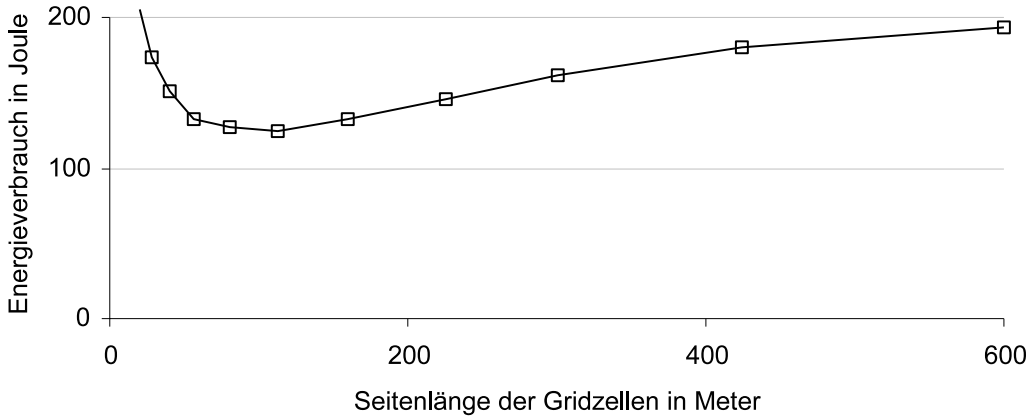


Abbildung 7.21: Energieverbrauch der mobilen Objekte bei Grid-Verfahren

ist nicht notwendig und die Zahl der Positionsübermittlungen etwas kleiner.

Anzahl der Nachrichten vom Lokationsdienst Abbildung 7.20 zeigt die Anzahl der Nachrichten vom Lokationsdienst, das heißt, die Zahl der Änderungen am Gridmuster. Bei großen Gridzellen ist die Zahl sehr gering, da neue Anfragen oder das Zurückziehen von Anfragen das Gridmuster oft unverändert lassen.

Energieverbrauch der mobilen Objekte Abbildung 7.21 stellt den Energieverbrauch eines mobilen Objekts dar.

Zur Berechnung wurden folgende Energiekosten verwendet: Eine Positionsbestimmung verbraucht 0,04 Joule, eine Positionsübermittlung 0,2 Joule und der Empfang eines neuen Gridmusters beziehungsweise einer Änderung daran 0,1 Joule bis 0,9 Joule. Da benachbarte Gridzellen mit gleichen Eigenschaften effizient kodiert werden können und nicht einzeln übertragen werden müssen, wurde angenommen, dass die Energiekosten zum Empfang eines Gridmusters sublinear abhängig von der Zahl der Gridzellen sind.

Das Diagramm zeigt anschaulich, bei welcher Gridzellengröße der Energieverbrauch bei der

gegebenen Anfragelast minimal ist.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die vorangegangen Kapitel zusammengefasst und die Ergebnisse abschließend bewertet. In Abschnitt 8.2 werden Forschungsthemen genannt, die als Konsequenz dieser Arbeit untersucht werden sollten.

8.1 Zusammenfassung und Bewertung

Ziel dieser Arbeit war die Minimierung des Energieverbrauchs mobiler Objekte zum Lokationsmanagement. Dazu sollten die mobilen Objekte ihre Position möglichst selten bestimmen oder übermitteln. Außerdem sind Zahl und Länge der Nachrichten, die sie vom Lokationsdienst empfangen müssen, so klein wie möglich zu halten.

Ältere Verfahren zur Verarbeitung von Anfragen im Lokationsmanagement versuchen vor allem, die Zahl der Positionsübermittlungen zu minimieren, um das Mobilkommunikationssystem und die Datenbank des Lokationsdienstes zu schonen. Die Reduzierung oder gar Minimierung des Energieverbrauchs streben sie nur teilweise an.

Die Hersteller gängiger Positionsbestimmungssysteme bieten spezielle Modi an, bei denen die Position seltener bestimmt und damit Energie gespart wird. Das gilt insbesondere für GPS-Empfänger. Wie diskutiert, eignet sich periodische Positionsbestimmung normalerweise nicht zur Minimierung des Energieverbrauchs, wohl aber variable Positionsbestimmung.

Kontinuierliche Anfragen und Toleranzen Damit der Lokationsdienst und die mobilen Objekte den Informationsbedarf anfragender Anwendungen möglichst genau kennen, wurden in kontinuierliche Anfragen und Toleranzen untersucht. Mit kontinuierlichen Anfragen kann die Zahl der Nachrichten, die die mobilen Objekte empfangen müssen, und die Zahl der Positionsübermittlungen, verglichen mit der Verwendung diskreter Anfragen, erheblich reduziert werden.

Erlaubt eine Anfrage eine zeitliche oder räumliche Toleranz, so kann mit dieser die Zahl der Positionsbestimmungen und -übermittlungen reduziert werden, wie in der Diskussion möglicher Verfahren zur Verarbeitung der wichtigsten Anfragetypen gezeigt wurde.

Tracking mobiler Objekte Beim Tracking mobiler Objekte, wie zum Beispiel bei kontinuierlichen Positionsanfragen und innerhalb des angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage, kann zur Positionsübermittlung auf das entfernungsbasiert berichtende Protokoll und Koppelnavigationsprotokolle zurückgegriffen werden. Voraussetzung ist, dass die Anfragen eine räumliche Toleranz erlauben.

In Abschnitt 5.4 wurde gezeigt, dass die ursprüngliche Vorgehensweise bei diesen Protokollen zwar die Zahl der Positionsübermittlungen minimiert, nicht aber den Energieverbrauch. Daher wurden zwei Vorgehensweisen entwickelt, die eine Minimierung des Energieverbrauchs anstreben. Die Zweite minimiert den Energieverbrauch nachweislich bei geradliniger Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit, wie sie in der Realität abschnittsweise immer wieder anzutreffen ist. In Simulationen reduzierte diese Vorgehensweise den Energieverbrauch um bis zu 40%, verglichen mit der ursprünglichen.

Gebiets- und Gebietspositionsanfragen Zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen wurde zunächst das theoretische Minimum an Positionsbestimmungen und -übermittlungen diskutiert. Anschließend wurde der Lösungsraum für mögliche Verfahren zur Verarbeitung dieser Anfragetypen untersucht. Mit der Diskussion konkreter Verfahren wurde ein völlig neuer Ansatz, das Grid-Verfahren, entwickelt. Im Gegensatz zu älteren Verfahren bietet es einen Parameter – die Größe der Gridzellen –, über den die Zahl der Positionsbestimmungen und die Zahl der Positionsübermittlungen gegenüber der Zahl und Länge der Nachrichten, die von den mobilen Objekten empfangen werden müssen, abgewogen werden können.

Die möglichen Verfahren zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen wurden theoretisch analysiert und in Simulationen erprobt und evaluiert. Keines der vorgestellten Verfahren übertrifft die anderen generell – jedes Verfahren hat besondere Eigenschaften, die es für bestimmte Szenarien aus Anfragelast, Energiekosten und Bewegung der mobilen Objekte besonders geeignet machen. Besonders hervorzuheben ist das Grid-Verfahren, da es bei hoher Anfragelast automatisch für einen ständigen Wechsel in ein berichtendes Protokoll sorgt und damit den Energieverbrauch minimiert.

In Simulationen wurde ferner gezeigt, dass die Zahl der Positionsbestimmungen durch die Anpassung an den tatsächlichen Informationsbedarf erheblich reduziert werden kann. Auch bei sehr hoher Anfragelast – 10000 Gebietsanfragen auf einem 4,5 Quadratkilometer großen Dienstgebiet – kann die Zahl der Positionsbestimmungen noch um über 30% reduziert werden, wenn die mobilen Objekte vollständig über die Anfragen informiert werden.

Bei geringer Anfragelast wird der Energieverbrauch, verglichen mit ständiger Positionsbestimmung, teilweise um über 95% reduziert.

Bewertung Generell müssen die verschiedenen Aspekte des Lokationsmanagements, die den Energieverbrauch der mobilen Objekte betreffen, zu dessen Minimierung gemeinsam betrachtet werden. Das wurde in dieser Arbeit konsequent beachtet. Die entwickelten Verfahren und Vorgehensweisen reduzieren den Energieverbrauch der mobilen Objekte erheblich und sind zur Energieschonung im Lokationsmanagement sehr gut geeignet.

8.2 Ausblick

In diesem Abschnitt werden zwei Aspekte energieschonenden Lokationsmanagements genannt, deren Untersuchung in weiteren Forschungsarbeiten besonders nützlich und viel versprechend scheint.

Adaptive Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen In Kapitel 6 wurden vier Verfahren zur Verarbeitung von Gebiets- und Gebietspositionsanfragen entwickelt. Keines der vier minimiert den Energieverbrauch generell und daher sollte – vor allem in Abhängigkeit von der Anfragelast – bei Bedarf in das am besten geeignete Verfahren gewechselt werden.

Zu untersuchen ist, wann ein solcher Wechsel exakt erfolgen sollte und wie er möglichst energieschonend gestaltet werden kann. Wird das Dienstgebiet in große Zellen partitioniert, wie beim Anfragen Mitteilen und beim Grid-Verfahren, so bietet sich an, für jede Zelle individuell zu entscheiden, ob in ihr das Grid-Verfahren verwendet wird oder die mobilen Objekte vollständig über die Anfragen informiert werden.

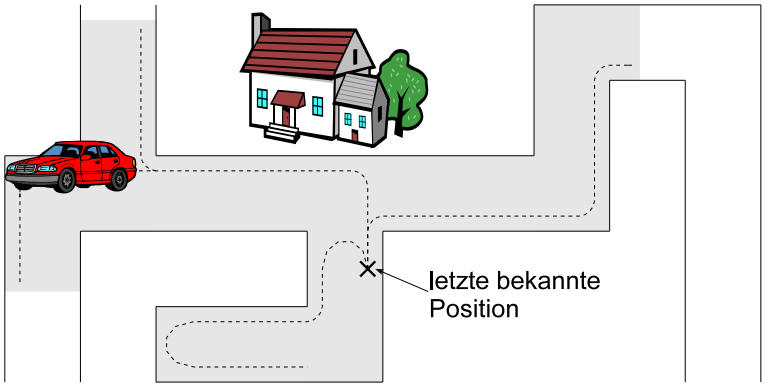


Abbildung 8.1: Möglicher Aufenthaltsbereich in einem Straßennetz

Möglicher Aufenthaltsbereich Fast alle in den vorangehenden Kapiteln entwickelten Verfahren verwenden die möglichen Aufenthaltsbereiche der mobilen Objekte. Nur bei Positionsanfragen und innerhalb des angefragten Gebiets einer Gebietspositionsanfrage erfolgt die Positionsbestimmung und -übermittlung bei zeitlicher Toleranz unabhängig von den möglichen Aufenthaltsbereichen.

In Abschnitt 2.9 wurde erläutert, wie ein möglicher Aufenthaltsbereich aus der letzten bekannten Position und der Maximalgeschwindigkeit eines mobilen Objekts berechnet werden kann.

Je genauer der mögliche Aufenthaltsbereich eines mobilen Objekts bestimmt wird, desto kleiner ist er. Entsprechend seltener muss das mobile Objekt seine Position bei den oben genannten Verfahren bestimmen und übermitteln.

Im Folgenden werden vier besonders wichtige Ansätze vorgestellt, mit denen der mögliche Aufenthaltsbereich genauer bestimmt werden kann:

1. *Maximale Beschleunigung:* Mobile Objekte können nicht beliebig beschleunigen oder verzögern. Bewegt sich ein mobiles Objekt momentan relativ langsam, so kann es die Maximalgeschwindigkeit nicht sofort erreichen, und der mögliche Aufenthaltsbereich ist tatsächlich etwas kleiner, als durch die Maximalgeschwindigkeit angegeben.

   Bewegt sich ein mobiles Objekt relativ schnell, so kann es nicht sofort wenden oder besonders enge Kurven nehmen. Wiederum lässt sich der mögliche Aufenthaltsbereich weiter eingrenzen.

2. *Wege- oder Straßennetz:* Einige mobile Objekte bewegen sich nur auf vorab bekannten Wegen oder Straßen. Mehrere Koppelnavigationsprotokolle nutzen diese Eigenschaft zur Reduzierung der Zahl der Positionsübermittlungen. Wege- und Straßennetze können nicht nur mit Koppelnavigationsprotokollen, sondern generell zur Beschränkung des möglichen Aufenthaltsbereichs genutzt werden, wie in Abbildung 8.1 exemplarisch dargestellt.

3. *Adaptive Maximalgeschwindigkeit:* Oft kann aus dem Kontext auf die Maximalgeschwindigkeit eines mobilen Objekts geschlossen werden. Repräsentiert das mobile Objekt zum Beispiel einen Passanten, so ist die Maximalgeschwindigkeit in einer Fußgängerzone oder einem Park relativ klein. Erst wenn sich der Passant einer Straße nähert, wo er zum Beispiel in ein Auto einsteigen kann, wird die Maximalgeschwindigkeit größer.

Bei Autos wiederum kann aus der Straße, die sie gerade befahren, auf die Maximalgeschwindigkeit geschlossen werden.

4. *Stillstand:* Steht ein mobiles Objekt still, so beschränkt sich sein Aufenthaltsbereich auf einen Punkt beziehungsweise einen Kreis mit Radius g_B, die maximale Abweichung des Positionsbestimmungssystems.

   Stillstand lässt sich mit empfindlichen Erschütterungssensoren besonders energieeffizient ermitteln. Stellt ein entsprechend ausgestattetes mobiles Endgerät fest, dass es seit einigen Sekunden oder Minuten nicht bewegt wurde, so kann es dies dem Lokationsdienst melden. Der Lokationsdienst behandelt es fortan wie ein stationäres Objekt, das seine Position nicht bestimmen muss, und das mobile Endgerät kann in einen energieschonenden Schlafmodus wechseln – nur der Erschütterungssensor muss überwacht werden.

   Wird das mobile Endgerät wieder aufgenommen und bewegt, so signalisiert dies der Erschütterungssensor. Das mobile Endgerät meldet sich beim Lokationsdienst und nimmt fortan wieder als mobiles Objekt am Lokationsmanagement teil.

Wird der mögliche Aufenthaltsbereich mit einem oder mehreren dieser Ansätze genauer bestimmt, so ist $\hat{v}_{\mathrm{OID}}$ bei den in dieser Arbeit durchgeführten Rechnungen entsprechend zu ersetzen.

Gegebenenfalls können alle vier Ansätze gleichzeitig zur genaueren Bestimmung des möglichen Aufenthaltsbereichs verwendet werden.

Literaturverzeichnis

[3GPP 2004] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group GSM/ EDGE: *Radio Access Network; Physical layer on the radio path; General description*. `http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/45001.htm`, V6.5.0. November 2004. Zugriffsdatum: 9. März 2005.

[3GPP 2004b] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network: *Services provided by the physical layer*. `http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/25302.htm`, V6.2.0. Dezember 2004. Zugriffsdatum: 9. März 2005.

[Active Badge] AT&T Laboratories: *Active Badge System*. `http://www.uk.research.att.com/ab.html`. Cambridge, Großbritannien. Letzte Änderung: Juli 2004. Zugriffsdatum: 2. März 2005.

[Amb 2004] AmbiCom, Inc.: *Bluetooth GPS Navigation System*. `http://www.ambicom.com/products/air2net/btgps-spec.pdf`. Letzte Änderung: März 2004. Zugriffsdatum: 15. Februar 2005.

[Ath 2003] Atheros Communications, Inc.: *Power Consumption and Energy Efficiency Comparisons of WLAN Products*. `http://www.atheros.com/pt/papers.html`. Mai 2003. Zugriffsdatum: 9. März 2005.

[Atm 2003] Atmel: *GPS Chipset for Mobile, Navigation and Multimedia Applications*. `http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc4606.pdf`. Letzte Änderung: Februar 2003. Zugriffsdatum: 10. Februar 2005.

[Bat] AT&T Laboratories: *The Bat Ultrasonic Location System*. `http://www.uk.research.att.com/bat/`. Cambridge, Großbritannien. Letzte Änderung: Februar 2003. Zugriffsdatum: 2. März 2005.

[BDST 2001] Hari Balakrishnan; Erik Demaine; Mike Stonebraker; Seth Teller: *ITR: Scalable Location-Aware Monitoring (SLAM) Systems*. Laboratory for Computer Science & Department of EECS, Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, Massachusetts, USA. November 2001.

[BP 2000] Paramvir Bahl; Venkata N. Padmanabhan: *RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System*. In: Proceedings of the 19th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2000). Tel-Aviv, Israel. März 2000.

[BW 2001] Thomas Brinkhoff; Jürgen Weitkämper: *Continuous Queries within an Architecture for Querying XML-Represented Moving Objects*. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Advances in Spatial and Temporal Databases (SSTD 2001), S. 136–154. Redondo Beach, Kalifornien, USA. Juli 2001.

[Canu] Illya Stepanov: *CANU Mobility Simulation Environment*. `http://canu.informatik.uni-stuttgart.de/mobisim/`, Stuttgart. Letzte Änderung: 13. Juli 2005. Zugriffsdatum: 10. August 2005.

[CDWTW 2000] Jianjun Chen; David J. DeWitt; Feng Tian; Yuan Wang: *NiagaraCQ: A Scalable Continuous Query System for Internet Databases*. In: Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data, S. 379–390. Dallas, Texas, USA. Mai 2000.

[CHC 2004] Ying Cai; Kien A. Hua; Guohong Cao: *Processing Range-Monitoring Queries on Heterogeneous Mobile Objects*. IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM 2004). Januar 2004.

[ČJP 2005] Alminas Čivilis; Christian S. Jensen; Stardas Pakalnis: *Techniques for Efficient Road-Network-Based Tracking of Moving Objects*. In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 17, No. 5, S. 698–712. Mai 2005.

[Cricket] Massachusetts Institute of Technology: *The Cricket Indoor Location System*. `http://nms.lcs.mit.edu/projects/cricket/`. Cambridge, Massachusetts, USA. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 16. Februar 2005.

[Dro 2003] Tobias Drosdol: *Unterstützung symbolischer Koordinaten im Lokationsmanagement*. Universität Stuttgart [Diplomarbeit]. April 2003.

[Dud 2002] Dominique Dudkowski: *Ereignisse im Nexus-Lokationsdienst*. Universität Stuttgart [Studienarbeit]. Februar 2002.

[E911] Federal Communications Commission: *911 Services*. `http://www.fcc.gov/911/`, Washington, DC, USA. Letzte Änderung: November 2004. Zugriffsdatum: 19. April 2005.

[Ekahau] Ekahau, Inc.: *Ekahau Positioning Engine 3.1*. `http://www.ekahau.com/products/positioningengine/`, Saratoga, Kalifornien, USA. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[Fal 2005] Falcom GmbH: *JP7-T Family GPS-Receiver Hardware description*. `http://www.falcom.de`, Langewiesen. Letzte Änderung: März 2005. Zugriffsdatum: 18. Juli 2005.

[FN 2001] Laura Marie Feeney; Martin Nilsson: *Investigating the Energy Consumption of a Wireless Network Interface in an Ad Hoc Networking Environment*. In: Proceedings of the Twentieth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2001). Anchorage, Alaska, USA. April 2001.

[Flame] University of Cambridge: *Framework for Location-Aware ModElling*. `http://www-lce.eng.cam.ac.uk/qosdream/`. Cambridge, Großbritannien. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 16. Februar 2005.

[For 2004] Fortuna Electronic Corp.: *PocketTrack CF Card Type GPS Receiver*. `http://www.fortuna.com.tw/GPS-CF.htm`. Letzte Änderung: April 2004. Zugriffsdatum: 15. Februar 2005.

[For 2005] Fortuna Electronic Corp.: *Slim Bluetooth GPS Receiver*. `http://www.fortuna.com.tw/slim.htm`. Letzte Änderung: Juli 2005. Zugriffsdatum: 22. Juli 2005.

[Galileo] Generaldirektion Energie und Verkehr der Europäischen Kommission: *GALILEO Europäisches Satellitennavigationssystem*. `http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/`. Letzte Änderung: September 2004. Zugriffsdatum: 19. April 2005.

[Gal 2004] Generaldirektion Energie und Verkehr der Europäischen Kommission: *Galileo: Europe shows the way*. Video, `http://europa.eu.int/comm/dgs/energy_transport/galileo/video/index_en.htm`. Dezember 2004. Zugriffsdatum: 19. April 2005.

[GBE+ 2000] Ralf Hartmut Güting; Michael H. Böhlen; Martin Erwig; Christian S. Jensen; Nikos A. Lorentzos; Markus Schneider; Michalis Vazirgiannis: *A Foundation for Representing and Querying Moving Objects*. In: ACM Transactions on Database Systems, Vol. 25, No. 2, S. 1–42. März 2000.

[GL 2004] Buğra Gedik; Ling Liu: *MobiEyes: Distributed Processing of Continuously Moving Queries on Moving Objects in a Mobile System*. In: Proceedings of the 9th International Conference on Extending DataBase Technology (EDBT 2004), S.67–87. Heraklion, Kreta, Griechenland. März 2004.

[GMB+ 2002] G. Gramegna; G. Montagna; I. Bietti; M. Franciotta; A. Baschirotto; G. Abbotto; R. Pelleriti; M. Paparo; R. Castello: *A 35-mW - 3.6 mm^2 fully integrated 0.18µm CMOS GPS Radio*. In: European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC 2002), S. 431–434. Florenz, Italien. September 2002.

[GPS] U.S. Coast Guard Navigation Center: *GPS General Information*. `http://www.navcen.uscg.gov/gps/`. Alexandria, Virginia, USA. Letzte Änderung: Februar 2005. Zugriffsdatum: 2. März 2005.

[GWYL 2004] Buğra Gedik; Kun-Lung Wu; Philip Yu; Ling Liu: *Motion Adaptive Indexing for Moving Continual Queries over Moving Objects*. In: Proceedings of the Thirteenth ACM Conference on Information and Knowledge Management (CIKM 2004), S. 427–436. Washington, DC, USA. November 2004.

[HB 2001] Jeffrey Hightower; Gaetano Borriello: *Location Systems for Ubiquitous Computing*. In: IEEE Computer, Vol. 38, No. 8, S. 75–66. August 2001.

[IEEE 802.11] IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committe (Hg.): *IEEE, Std 802.11: Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specications*. IEEE Standards Association, `http://standards.ieee.org/getieee802/802.11.html`. 1999. Zugriffsdatum: 9. März 2005.

[JV 2002] Eun-Sun Jung; Nitin H. Vaidya: *An Energy Efficient MAC Protocol for Wireless LANs*. In: Proceedings of the 21st Annual Joint Conference of the

IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002). New York City, New York, USA. Juni 2002.

[KB 2002] Ronny Krashinsky; Hari Balakrishnan: *Minimizing Energy for Wireless Web Access with Bounded Slowdown*. In: Proceedings of the Eighth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2002), S. 119–130. Atlanta, Georgia, USA. September 2002.

[KTNH 1998] Jerry Knight; Greg Trotsky; Charles Norman; Denies Hilgenberg: *SiRF's Low Power Receiver Advances*. In: Proceedings of the 11th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GPS-98). Nashville, Tennessee, USA. September 1998.

[KW 2005] Anja Köhne; Michael Wößner: *GPS-Infos*. `http://www.kowoma.de/gps/`. Riehen, Schweiz. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 18. Juli 2005.

[Leo 2003] Alexander Leonhardi: *Architektur eines verteilten skalierbaren Lokationsdienstes*. Universität Stuttgart [Dissertation]. Juni 2003.

[LK 1999] Alexander Leonhardi; Uwe Kubach: *An Architecture for a Distributed Universal Location Service*. In: Proceedings of the European Wireless Conference, S. 351–355. München. Oktober 1999.

[LMCC+ 2005] Anthony LaMarca; Yatin Chawathe; Sunny Consolvo; Jeffrey Hightower; Ian Smith; James Scott; Tim Sohn; James Howard; Jeff Hughes; Fred Potter; Jason Tabert; Pauline Powledge; Gaetano Borriello; Bill Schilit: *Place Lab: Device Positioning Using Radio Beacons in the Wild*. In: Proceedings of the Third International Conference on Pervasive Computing (Pervasive 2005), S. 116–133. München. Mai 2005.

[LR 2002] Alexander Leonhardi; Kurt Rothermel: *Architecture of a Large-scale Location Service*. Short Paper in Proceedings of the 22nd Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2002), S. 465–466. Wien, Österreich. Juli 2002.

[LUL+ 2001] Kam-Yiu Lam; Özgür Ulusoy; Tony S.H. Lee; Edward Chan; Guohui Li: *An Efficient Method for Generating Location Updates for Processing of Location-Dependent Continuous Queries*. International Conference on Database Systems for Advanced Applications (DASFAA 2001). Hongkong. April 2001.

[MAHP 2003] Mohamed F. Mokbel; Walid G. Aref; Susanne E. Hambrusch; Sunil Prabhakar: *Towards Scalable Locationaware Services: Requirements and Research Issues*. In: Proceedings of the Eleventh ACM International Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM-GIS 2003), S. 110–117. New Orleans, Louisiana, USA. November 2003.

[Mic 2004] Micronet Communications, Inc.: *Quick Installation Guide CF GPS Receiver Model No.: SP3130*. `http://www.micronet.info/download/manual/GPRS/SP3130_QIG.pdf`. Letzte Änderung: Juni 2004. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[Mok 2004] Mohamed F. Mokbel: *Continuous Query Processing in Spatio-temporal Databases*. In: Proceedings of the ICDE/EDBT Ph.D. Workshop 2004, S. 119–128. Boston, Massachusetts, USA. März 2004.

[Mot 2001] Motorola GmbH: *Motorola reporter*. Kundenmagazin, Ausgabe 03/2001, `http://www.motorola.com/mot/doc/0/429_MotDoc.pdf`. September 2001.

[Mot 2003] Motorola, Inc.: *FS Oncore Receiver*. `http://www.synergy-gps.com/FS_Oncore_Brochure.pdf`. Letzte Änderung: September 2003. Zugriffsdatum: 15. Februar 2005.

[Nexus] Universität Stuttgart: *SFB 627: Nexus – Umgebungsmodelle für Mobile Kontextbezogene Systeme*. `http://www.nexus.uni-stuttgart.de/`. Stuttgart. Letzte Änderung: Februar 2005. Zugriffsdatum: 25. Februar 2005.

[NGS 2003] Daniela Nicklas; Matthias Grossmann; Thomas Schwarz: *NexusScout: An Advanced Location-Based Application on a Distributed, Open Mediation Platform*. In: Proceedings of 29th International Conference on Very Large Data Bases (VLDB 2003). Berlin. September 2003.

[NGS+ 2001] Daniela Nicklas; Matthias Großmann; Thomas Schwarz; Steffen Volz; Bernhard Mitschang: *A model-based, open architecture for mobile, spatially aware applications*. In: Proceedings of the 7th International Symposium on Spatial and Temporal Databases (SSTD 2001). Redondo Beach, Kalifornien, USA. Juli 2001.

[NM 2001] Daniela Nicklas; Bernhard Mitschang: *The NEXUS Augmented World Model: An extensible approach for mobile, spatially aware applications*. In: Proceedings of the 7th International Conference on Object-Oriented Information Systems (OOIS 2001). Calgary, Kanada. August 2001.

[Nok 2005] Nokia Deutschland GmbH: *Mobiltelefone – Modellübersicht*. `http://www.nokia.de/de/mobiltelefone/638.html`. Bochum. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 22. Juli 2005.

[Place] Purdue University: *Pervasive Location Aware Computing Environments*. `http://www.cs.purdue.edu/place/`. West Lafayette, Indiana, USA. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 15. Februar 2005.

[PMP 2003] Cynthia A. Patterson; Richard R. Muntz; Cherri M. Pancake: *Challenges in Location-Aware Computing*. In: IEEE Pervasive Computing, Vol. 2, No. 2, S. 80–89. April 2003.

[PPM+ 2003] N. Prigouris; G. Papazafeiropoulos; I. Marias; S. Hadjiefthymiades; L. Merakos: *Building a Generic Broker for Location Retrieval*. In: Proceedings of the IST Mobile & Wireless Communications Summit. Aveiro, Portugal. Juni 2003.

[PS 2001] Evaggelia Pitoura; George Samaras: *Locating Objects in Mobile Computing*. In: IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 13, No. 4, S. 571–592. Juli 2001.

[PXK+ 2002] Sunil Prabhakar; Yuni Xia; Dmitri V. Kalashnikov; Walid G. Aref; Susanne E. Hambrusch: *Query Indexing and Velocity Constrained Indexing: Scalable Techniques for Continuous Queries on Moving Objects*. In: IEEE Transactions on Computers, Vol. 51, No. 10, S. 1124–1140. Oktober 2002.

[Rau 2003] Hans Jürgen Rauscher: *Der Wireless-Standard 802.11*. Funkschau 22/2003, S. 57–58. November 2003.

[Rik 2004] Rikaline International Corp.: *GPS-6030 Bluetooth GPS Receiver*. `http://www.rikaline.com/bluetooth_gps6030.htm`. Letzte Änderung: Mai 2004. Zugriffsdatum: 15. Februar 2005.

[Rik 2005] Rikaline International Corp.: *GPS-6012, GPS-6010-X5, and GPS-6010*. `http://www.rikaline.com/gps_receiver.htm`. Letzte Änderung: Januar 2005. Zugriffsdatum: 10. Februar 2005.

[Rou 2004] Round Solutions: *GPRS-Modul mit RS232 für GSM 900 / GSM 1800 / GSM 1900*. `http://www.gsm-modem.de/gps/modul-gprs.html`. Dreieich. Letzte Änderung: Mai 2004. Zugriffsdatum: 30. März 2005.

[Rover] University of Maryland: *Rover*. `http://www.mindlab.umd.edu/research_rover.shtml`. College Park, Maryland, USA. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 16. Februar 2005.

[RS 2005] Matthew Rabinowitz; James J. Spilker, Jr.: *A New Positioning System Using Television Synchronization Signals*. In: IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 51, No. 1, S. 51–61. März 2005.

[SBGP 2004] Adam Smith; Hari Balakrishnan; Michel Goraczko; Nissanka Priyantha: *Tracking Moving Devices with the Cricket Location System*. In: 2nd International Conference on Mobile Systems, Applications and Services (Mobisys 2004). Boston, Massachusetts, USA. Juni 2004.

[SBS 2002] Eugene Shih; Paramvir Bahl; Michael J. Sinclair: *Wake on Wireless: An Event Driven Energy Saving Strategy for Battery Operated Devices*. In: Proceedings of the Eighth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (MOBICOM 2002). Atlanta, Georgia, USA. September 2002.

[SGHK 1996] Mark Stemm; Paul Gauthier; Daishi Harada; Randy H. Katz: *Reducing Power Consumption of Network Interfaces in Hand-Held Devices*. In: Proceedings of the 3rd International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC 1996). Princeton, New Jersey, USA. September 1996.

[Sch 2004] Alexander Schill: *Mobile Kommunikation und Mobile Computing*. Technische Universität Dresden [Skript zur gleichnamigen Vorlesung]. September 2004.

[SE 2005] Sony Ericsson Mobile Communications AG: *GM47/GM48 GSM/GPRS Radio Device (Data sheet)*. `http://www.sonyericsson.com/downloads/GM47_GM48%20R1K_2005-06-09.pdf`. Letzte Änderung: Mai 2005. Zugriffsdatum: 2. September 2005.

[SE 2005b] Sony Ericsson Mobile Communications AG: *Phone Portfolio*. `http://www.sonyericsson.com`. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 22. Juli 2005.

[Sie 2004] Siemens AG: *Navigating the Path Towards 3G*. `http://communications.siemens.com/repository/732/73270/BG_Navigating_to_3G.pdf`. Letzte Änderung: September 2004. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[Smart Floor] Georgia Institute of Technology: *Smart Floor*. `http://www.cc.gatech.edu/fce/smartfloor/`. Atlanta, Georgia, USA. Letzte Änderung: Februar 2000. Zugriffsdatum: 2. März 2005.

[SPRH 2004] MoonBae Song; KwangJin Park; JeHyok Ryu; Chong-Sun Hwang: *Modeling and Tracking Complexly Moving Objects in Location-Based Services*. Journal of Information Science and Engineering, Vol. 20, No. 3, S. 517–534. Mai 2004.

[SSM+ 1998] Derek K. Shaeffer; Arvin R. Shahani; S. S. Mohan; Hirad Samavati; Hamid R. Rategh; Maria del Mar Hershenson; Min Xu; C. Patrick Yue; Daniel J. Eddleman; Thomas H. Lee: *A 115-mW, 0.5-µm CMOS GPS Receiver with Wide Dynamic-Range Active Filters*. In: IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 33, No. 12, S. 2219–2231. Dezember 1998.

[SWCD 1997] A. Prasad Sistla; Ouri Wolfson; Sam Chamberlain; Son Dao: *Modeling and Querying Moving Objects*. In: Proceedings of the Thirteenth International Conference on Data Engineering (ICDE), S. 422–432. Birmingham, Großbritannien. April 1997.

[T-M 2005] T-Mobile Deutschland GmbH: *Reise & Verkehr in t-zones*. `http://www.t-mobile.de/reise_verkehr_t-zones/`. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 19. April 2005.

[Tha 2004] Thales Navigation, Inc.: *SkyNav GG12 GPS Board (Data sheet)*. `http://products.thalesnavigation.com/en/products/`. Letzte Änderung: Juli 2004. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[Tri 2003] Trimble Navigation Limited: *Lassen SQ GPS Module (Data sheet)*. `http://www.roundsolutions.com/gps/`. Letzte Änderung: Dezember 2003. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[UbiTrack] Technische Universität München: *Ubiquitous Tracking*. `http://wwwnavab.in.tum.de/view/Chair/ResearchArProjects`. Garching München. Letzte Änderung: unbekannt. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[Ubl 2000] u-blox AG: *Low Power Mode Application Note*. `http://www.linkwave.co.uk/assets/GPS.G1-X-00003.pdf`. Februar 2000. Zugriffsdatum: 15. Februar 2005.

[Ubl 2002] u-blox AG: *ANTARIS TIM-Lx GPS Modules System Integration Manual*. `http://www.u-blox.de/products/tim_la.html`. Juni 2002. Zugriffsdatum: 14. Juni 2005.

[Ubl 2004] u-blox AG: *Assisted GPS (A-GPS)*. `http://www.u-blox.de/technology/a-gps.html`. Letzte Änderung: Oktober 2004. Zugriffsdatum: 11. März 2005.

[Ubl 2005] u-blox AG: *ATR GPS Receiver Chipset ANTARIS Positioning Engine (Product summary)*. `http://www.u-blox.de/products/antaris.html`. Letzte Änderung: März 2005. Zugriffsdatum: 31. August 2005.

[VBH 2003] Marc A. Viredaz; Lawrence S. Brakmo; William R. Hamburgen: *Energy Management on Handheld Devices*. In: ACM Queue, Vol. 1, No. 7. Oktober 2003.

[VCDC+ 2002] Peter Vancorenland; Philippe Coppejans; Wouter De Cock; Paul Leroux; Michiel Steyaert: *Optimization of a fully integrated Low power CMOS GPS receiver*. In: Proceedings of the International Conference on Computer-Aided Design (ICCAD 2002), S. 305–308. San Jose, Kalifornien, USA. November 2002.

[VDL 2003] Tijs van Dam; Koen Langendoen: *An Adaptive Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*. In: Proceedings of the first international Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys 2003), S. 171–180. Los Angeles, Kalifornien, USA. November 2003.

[Vod 2003] Vodafone D2 GmbH: *Vodafone Friendzone: Nach der Schule in die mobile Community!*. Pressemitteilung, `http://www.vodafone.de/unternehmen/presse/28763_33177.html`. 7. April 2003.

[VW 2003] Marc A. Viredaz; Deborah A. Wallach: *Power Evaluation of a Handheld Computer*. In: IEEE Micro, Vol. 23, No. 3, S. 66–74. Januar 2003.

[Wik 2005] Wikipedia: *IEEE 802.11*. `http://de.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11`. Letzte Änderung: Juni 2005. Zugriffsdatum: 16. Juli 2005.

[Wol 2002] Ouri Wolfson: *Moving Objects Information Management: The Database Challenge*. In: Proceedings of the 5th Workshop on Next Generation Information Technologies and Systems (NGITS 2002). Cäsarea, Israel. Juni 2002.

[WSCY 1999] Ouri Wolfson; A. Prasad Sistla; Sam Chamberlain; Yelena Yesha: *Updating and Querying Databases that Track Mobile Units*. In: Distributed and Parallel Databases, Vol. 7, No. 3, S. 257–287. Juli 1999.

[WXCJ 1998] Ouri Wolfson; Bo Xu; Sam Chamberlain; Liqin Jiang: *Moving Objects Databases: Issues and Solutions*. In: Proceedings of the 10th International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM 1998), S. 111–122. Capri, Italien. Juli 1998.

[XMA+ 2004] Xiaopeng Xiong; Mohamed F. Mokbel; Walid G. Aref; Susanne Hambrusch; Sunil Prabhakar: *Scalable Spatio-temporal Continuous Query Processing for Location-aware Services*. In: Proceedings of the International Conference on Scientific and Statistical Database Management (SSDBM 2004), S. 317-326. Santorini Island, Griechenland. Juni 2004.

[YHE 2002] Wei Ye; John Heidemann; Deborah Estrin: *An Energy-Efficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks*. In: Proceedings of the 21st International Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies (INFOCOM 2002), Vol. 3, S. 1567–1576. New York City, New York, USA. Juni 2002.

[ZDP 2004] Andrea Zanella; Francesco De Pellegrini: *Mathematical Analysis of IEEE 802.11 Energy Efficiency*. In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2004). Abano Terme, Italien. September 2004.

[ZWS+ 2004] Martina Zitterbart; Kilian Weniger; Oliver Stanze; Peter Baumung; Tobias Küfner; Christian Vogt; Jidong Wu: *Mobilkommunikation*. Universität Karlsruhe [Skript zur gleichnamigen Vorlesung]. April 2004.

A Mathematische Analysen

In diesem Kapitel sind Berechnungen aufgeführt, die oben verkürzt dargestellt wurden.

A.1 Energieverbrauch beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll

In Abschnitt 5.2 wird gezeigt, wie der Energieverbrauch beim entfernungsbasiert berichtenden Protokoll und beim Koppelnavigationsprotokoll minimiert werden kann, indem die Position nicht erst übermittelt wird, wenn das mobile Objekt den Toleranzkreis zu verlassen droht.

In diesem Zusammenhang wird geradlinige Bewegung mit konstanter Geschwindigkeit untersucht. Wie in Abschnitt 5.2 gezeigt, gilt für die Zeitspanne $T_{i-1,i}$ zwischen dem Ende der $(i-1)$-ten und dem Ende der i-ten Positionsbestimmung nach der letzten Positionsübermittlung:

$$T_{i-1,i} = \frac{r_{i-1}}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} \text{ und } r_i = d_A - vT_{0,i}$$

Daraus wird im Folgenden die Zeitspanne $T_{0,i}$ zwischen der letzten Positionsübermittlung und dem Ende i-ten Positionsbestimmung. Zunächst kann aus obigen Gleichungen gefolgert werden:

$$T_{i-1,i} = \frac{r_{i-1}}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} = \frac{d_A - vT_{0,i-1}}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} = \frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} T_{0,i-1}$$

Wird auf beiden Seiten $T_{0,i-1}$ addiert, so ergibt sich:

$$T_{0,i-1} + T_{i-1,i} = T_{0,i-1} + \frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} T_{0,i-1} = \underbrace{\frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}}_{c} + T_{0,i-1} \underbrace{\left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)}_{a}$$

Mit a und c, wie eben definiert, folgt:

$$T_{0,i} = c + aT_{0,i-1}$$

Die rekursiven Gleichungen lassen sich wie folgt auflösen:

$$\begin{aligned}
T_{0,1} &= c \\
T_{0,2} &= c + aT_{0,1} = c + ac \\
T_{0,3} &= c + aT_{0,2} = c + a\,(c + ac) = c + ac + a^2c \\
T_{0,4} &= c + aT_{0,3} = c + a\left(c + ac + a^2c\right) = c + ac + a^2c + a^3c \\
&\vdots \\
T_{0,i} &= c + ac + a^2c + \ldots + a^{i-1}c = c\sum_{k=0}^{i-1} a^k
\end{aligned}$$

Es handelt sich um eine endliche geometrische Reihe:

$$T_{0,i} = c\sum_{k=0}^{i-1} a^k = c\frac{1-a^i}{1-a}$$

Mit c und a wie oben definiert ergibt sich:

$$T_{0,i} = \frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^i}{1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)} = \frac{d_A}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}} \cdot \frac{1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^i}{\frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}} = \frac{d_A}{v}\left(1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^i\right)$$

Die Zeitspanne zwischen der letzten Positionsübermittlung und dem Ende der anschließend i-ten Positionsbestimmung ist:

$$T_{0,i} = \frac{d_A}{v}\left(1 - \left(1 - \frac{v}{\hat{v}_{\mathrm{OID}}}\right)^i\right)$$

A.2 Hohe Anfragelast durch diskrete Positionsanfragen

In Abschnitt 5.6 wird angegeben, ab welcher Anfragelast T_Z^{-1} ein periodisch berichtendes Protokoll bei diskreten Positionsanfragen, die eine zeitliche Toleranz T_A erlauben, energieschonender als Auffordern zur Positionsübermittlung ist.

Positionsbestimmungsrate bei Aufforderungen Über ein bestimmtes mobiles Objekt werden viele diskrete Positionsanfragen mit gleicher zeitlicher Toleranz T_A unabhängig voneinander gestellt. Ihre Ankunft kann als Poisson-Prozess modelliert werden, das heißt mit exponentialverteilten Zwischenankunftszeiten. T_Z sei die durchschnittliche Zwischenankunftszeit.

Nach einer diskreten Positionsanfrage, die eine Positionsübermittlung erfordert hat, kann der Lokationsdienst durchschnittlich die nächsten T_A/T_Z Anfragen ohne Aufforderungen beantworten. Voraussetzung ist, dass die übermittelten Positionsdaten aktuell sind, das heißt eben erst bestimmt wurden, wie oben angenommen. Mit einer Aufforderung werden im Schnitt

$$n_A = 1 + \frac{T_A}{T_Z}$$

Anfragen beantwortet. Der Zeitabstand zwischen zwei Aufforderungen ist durchschnittlich

$$n_A T_Z = \left(1 + \frac{T_A}{T_Z}\right) T_Z = T_A + T_Z.$$

Die durchschnittliche Rate, mit der Aufforderung, Positionsbestimmung und -übermittlung erfolgen, ist:

$$\frac{1}{T_A + T_Z}$$

Anfragelast ab der periodisches Berichten günstiger Bei Aufforderungen beträgt die durchschnittliche Leistungsaufnahme des mobilen Objekts:

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}} = \frac{W_A + W_B + W_U}{T_A + T_Z}$$

W_A ist der Energieverbrauch für den Empfang der Aufforderung, W_B für die Positionsbestimmung und W_U für die Positionsübermittlung.

Soll auf Aufforderungen ganz verzichtet werden, so muss das mobile Objekt seine Position mit Rate T_A^{-1} bestimmen und übermitteln. Für die durchschnittliche Leistungsaufnahme gilt:

$$\overline{P}_{\mathrm{OID}} = \frac{W_B + W_U}{T_A}$$

Periodisches Berichten ist energieschonender als eventuelles Auffordern, wenn die Ankunftsrate T_Z^{-1} der diskreten Positionsanfragen größer als

$$\frac{W_B + W_U}{W_A T_A}$$

ist. Dies ergibt sich aus dem Vergleich der Leistungsaufnahmen:

$$\begin{aligned}
&\frac{W_A + W_B + W_U}{T_A + T_Z} > \frac{W_B + W_U}{T_A} \\
\Leftrightarrow\ &(W_A + W_B + W_U)\, T_A > (W_B + W_U)\,(T_A + T_Z) \\
\Leftrightarrow\ &W_A T_A > (W_B + W_U)\, T_Z \\
\Leftrightarrow\ &T_Z < \frac{W_A T_A}{W_B + W_U} \\
\Leftrightarrow\ &\frac{1}{T_Z} > \frac{W_B + W_U}{W_A T_A}
\end{aligned}$$

A.3 Gleichverteilt gewählte Geschwindigkeit auf konstanter Entfernung

Für die Simulationen wurde die Bewegung der mobilen Objekte mit CanuMobiSim [Canu] modelliert. CanuMobiSim wählt aus einem vorgegebenen Geschwindigkeitsintervall gleichverteilt zufällig eine Geschwindigkeit, mit der sich ein mobiles Objekt zur nächsten Zielkreuzung bewegt.

Geringe Geschwindigkeiten werden bei diesem Vorgehen bevorzugt. Bei geringer Geschwindigkeit dauert es lange, bis die Zielkreuzung erreicht und eine neue Geschwindigkeit gewählt wird. Bei einer hohen Geschwindigkeit wird die Zielkreuzung rasch erreicht und eine neue Geschwindigkeit gewählt.

Sei $[v_{min}, v_{max}]$ das Geschwindigkeitsintervall, aus dem die Geschwindigkeiten gleichverteilt gewählt werden. V ist die zugehörige Zufallsvariable. Für die Zufallsvariable T, die Zeit, die ein mobiles Objekt für eine konstante Entfernung s benötigt, gilt:

$$T = \frac{s}{V}$$

Die Dichtefunktion $f_V(v)$ der Zufallsvariablen V lautet:

$$f_V(v) = \begin{cases} \frac{1}{v_{max} - v_{min}}, & \text{für } v_{min} \le v \le v_{max} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

Da T eine Funktion von V ist, berechnet sich der Erwartungswert $E(T)$ zu:

$$\begin{aligned}
E(T) &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s}{v} f_V(v)\, dv \\
&= \int_{v_{min}}^{v_{max}} \frac{s}{v} \cdot \frac{1}{v_{max} - v_{min}}\, dv \\
&= \frac{s \ln v}{v_{max} - v_{min}} \Big|_{v_{min}}^{v_{max}} \\
&= \frac{s\,(\ln v_{max} - \ln v_{min})}{v_{max} - v_{min}}
\end{aligned}$$

Aus $E(T)$ ergibt sich die Durchschnittsgeschwindigkeit $\bar{v}$ zu:

$$\bar{v} = \frac{s}{E\,(T)} = s\frac{v_{max} - v_{min}}{s\,(\ln v_{max} - \ln v_{min})} = \frac{v_{max} - v_{min}}{\ln v_{max} - \ln v_{min}}$$

Für $v_{min} = 0{,}83\,\mathrm{m/s} = 3\,\mathrm{km/h}$ und $v_{max} = 1{,}94\,\mathrm{m/s} = 7\,\mathrm{km/h}$ ergibt sich:

$$\bar{v} = 1{,}31\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} = 4{,}71\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{h}}$$

B Details zur Simulation

In diesem Kapitel sind weitere Details zu den Simulationen genannt, die in Kapitel 7 nicht aufgeführt wurden.

B.1 Parameter für einen Simulationslauf in XML

Die verschiedenen Parameter für einen Simulationslauf werden gemeinsam in einer XML-Datei angegeben. Die folgende Abbildung zeigt den Inhalt einer solchen XML-Datei.

```
<?xml version="1.0" ?>

<Simulation>

 <System maximalVelocity="2.78" endTime="3600.0"
    serviceAreaWidth="2413.01" serviceAreaHeight="1843.24"
    numberOfMobileObjects="1000"
    transmissionToPositionFixEnergyCostRatio="5.0">

  <GraphicalViewer scale="2.5" redrawSkip="500.0" redrawDelay="1.0"/>

  <PositioningSystem class="positioning.SIM_PositioningSystem_CanuSimData"
     timeToPositionFix="0.500"
     dataFile="MtMh_n1000_t4600_v0083-0194_s0000-0120_R01.txt"
     offsetSimulationTime="1000.0"/>

  <MobileObject class="mobileobjects.SIM_MobileObject_GridDR"/>

  <LocationService class="locationservice.SIM_LocationService_GridDR"
     cellsInX="8" cellsInY="6"/>

  <QueryEngine class="queries.SIM_QueryEngine_HotSpotContinuousQueries"
     minimalSpatialAccuracy="2.78" maximalSpatialAccuracy="5.56"
     minimalQueryRadius="10.0" maximalQueryRadius="100.0"
     numberOfConcurrentPositionQueries="0"
     numberOfConcurrentRangeQueries="80"
     umberOfConcurrentRangePositionQueries="20"
     numberOfHotSpots="100"
     maximalDistanceFromHotSpot="100.0"
     averageQueryLifeTime="3600.0"
     randomSeed="1"/>

 </System>

</Simulation>
```

Parameter für einen Simulationslauf in XML

B.2 Ergebnisse eines Simulationslaufes

Die folgende Abbildung zeigt die Ausgabe der Simulationsumgebung nach einem Simulationslauf.

```
SystemControl:
Service area's width = 2413.01     Service area's height = 1843.24
Maximal velocity = 2.78
Transmission to Position Fix Energy Cost Ratio = 5.0     Simulation time = 3600.0
Number of processed events = 1130263

PositioningSystem:
Class = SIM_PositioningSystem_CanuSimData
Time to position fix (given parameter) = 0.5
Number of position fixes at all = 564947
Number of position fixes per mobile object = 564.95
Name of data file = ..\CanuMobiSim\data\MtMh_n1000_t4600_v0083-0194_s0000-0120_R02.txt
Offset simulation time = 1000.0

QueryEngine:
Class = SIM_QueryEngine_HotSpotContinuousQueries
Minimal spatial accuracy = 2.78     Maximal spatial accuracy = 5.56
Minimal query radius = 10.0     Maximal query radius = 100.0
Number of concurrent position queries = 0
Number of concurrent range queries = 80
Number of concurrent range position queries = 20
Number of position queries at all = 0
Number of range queries at all = 165
Number of range position queries at all = 34
Average query life time = 3600.0
Number of hot spots = 100     Maximal distance from hot spot = 100.0
Random seed = 4

CommunicationSystem:
Number of broadcast query-messages to all mobile objects (at time 0.0) = 100
Number of Position-update-messages to location service at all (after time 0.0) = 110444
Number of Position-update-messages to location service per mobile object (after time 0.0) = 110.4
Number of broadcast query-messages to all mobile objects (after time 0.0) = 198

LocationService:
Class = SIM_LocationService_KnowsQueries

Mobile Objects:
Class = SIM_MobileObject_KnowsQueries
Number of mobile objects = 1000
```

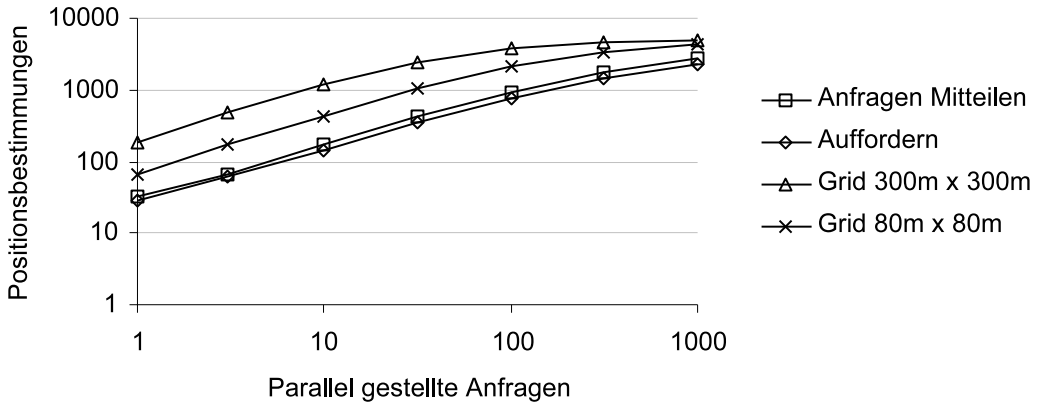
Ergebnisse eines Simulationslaufes

B.3 Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen

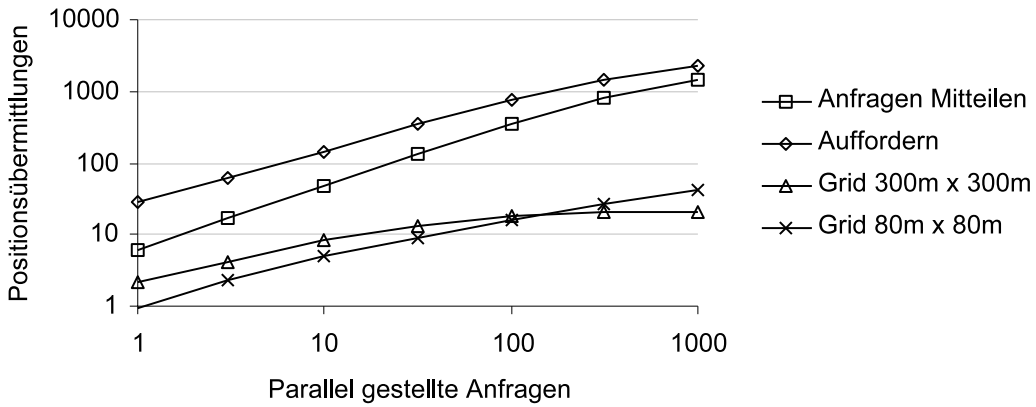
In Abschnitt 7.5 wurden drei Verfahren zur Verarbeitung kontinuierlicher Gebiets- und Gebietspositionsanfragen in Simulationen miteinander verglichen. Die Zahl der parallel gestellten Anfragen setzte sich dabei zu 80% aus Gebietsanfragen und 20% Gebietspositionsanfragen zusammen.

Die folgenden Diagramme sind aus Simulationen entstanden, bei denen die Zusammensetzung der Anfragelast umgekehrt wurde, das heißt, 20% der Anfragen sind Gebietsanfragen und 80% Gebietspositionsanfragen.

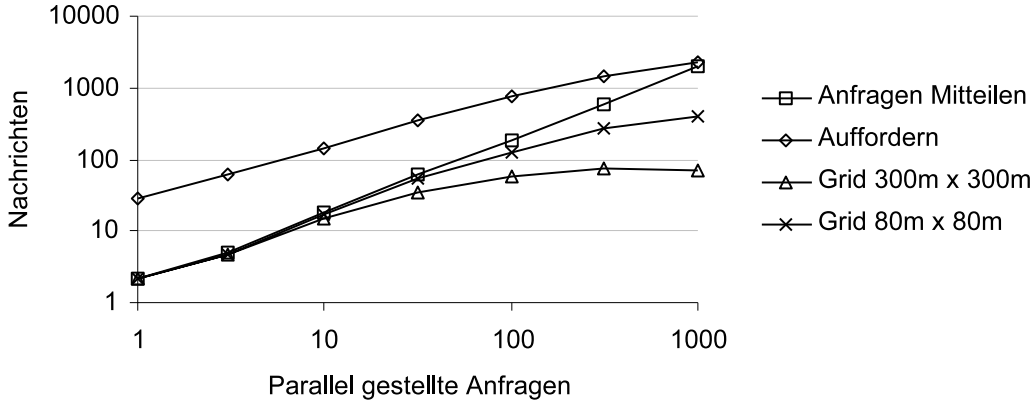
Langlebige Anfragen Zunächst wurden die drei Verfahren mit Anfragen simuliert, deren durchschnittliche Lebensdauer 60 Minuten betrug.



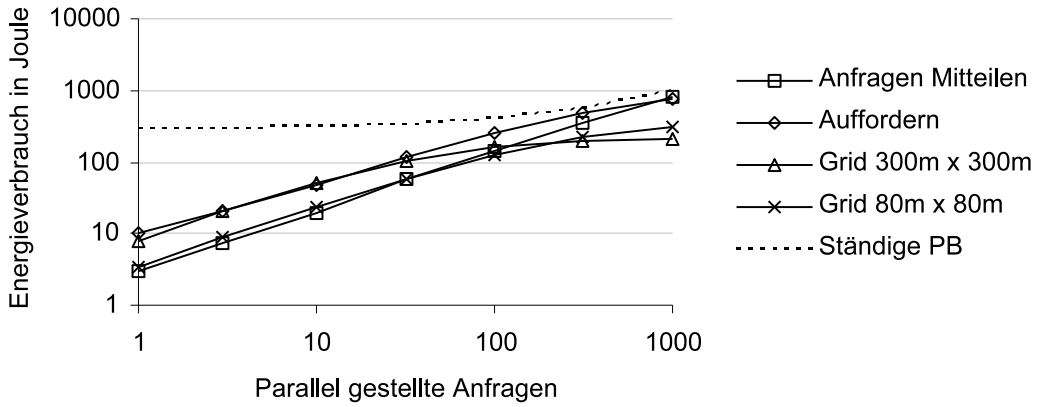
Anzahl der Positionsbestimmungen bei langlebigen Anfragen



Anzahl der Positionsübermittlungen bei langlebigen Anfragen

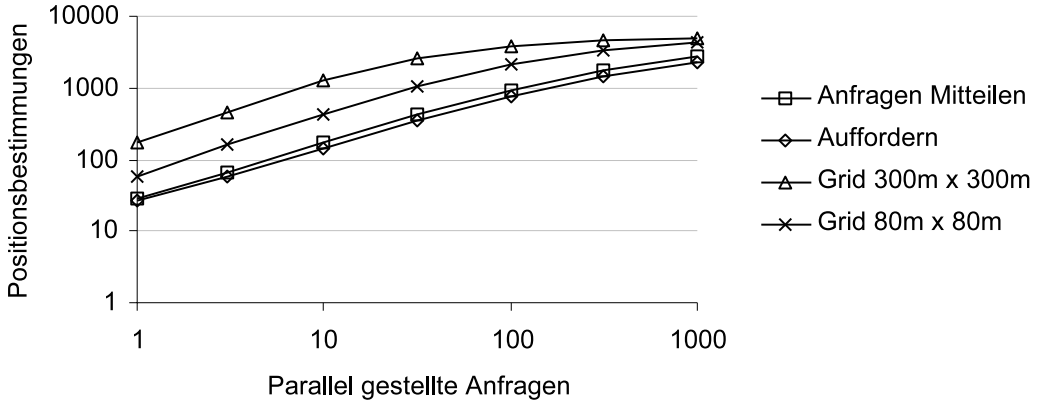


Anzahl der Nachrichten bei langlebigen Anfragen

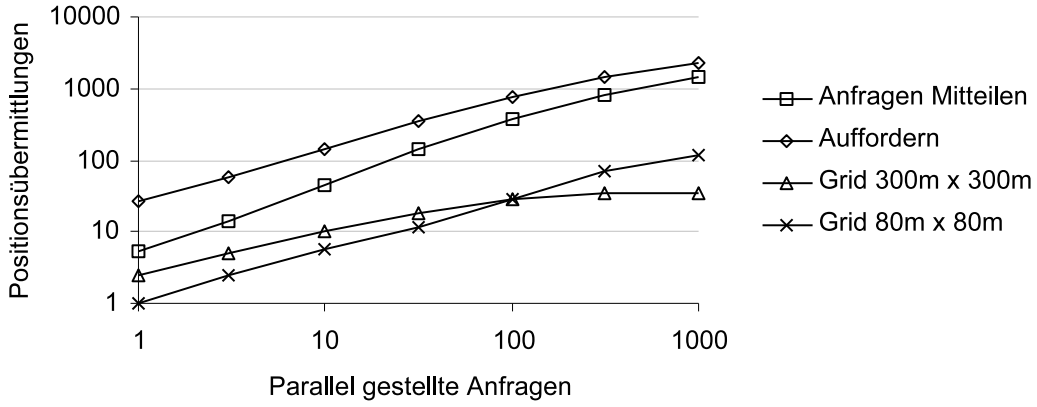


Energieverbrauch der mobilen Objekte bei langlebigen Anfragen

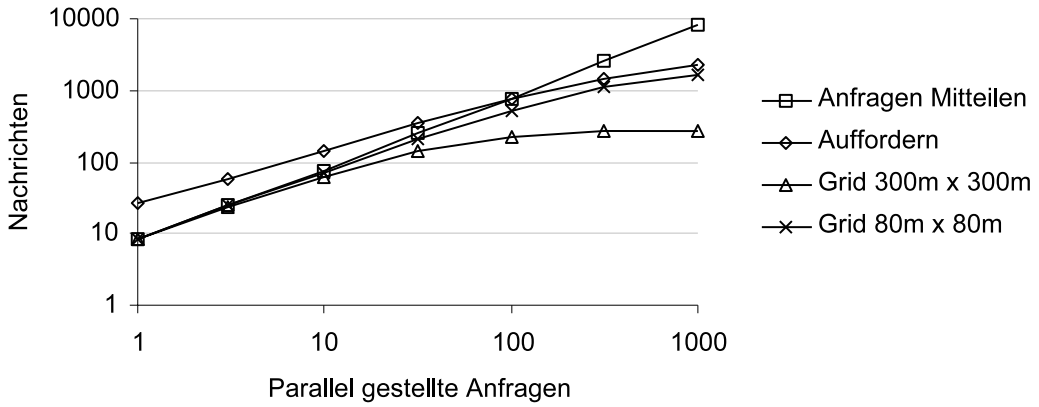
Kurzlebige Anfragen Die folgenden Diagramme sind aus Simulationen entstanden, bei denen die Anfragen eine durchschnittliche Lebensdauer von 15 Minuten hatten.



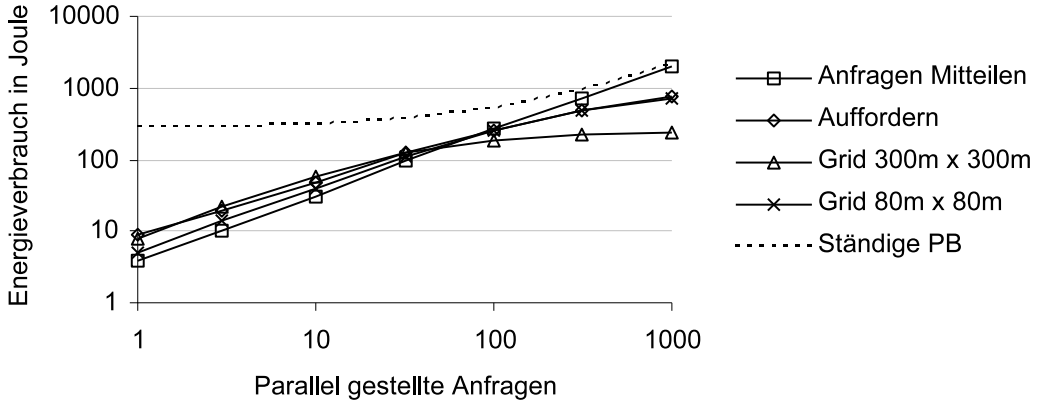
Anzahl der Positionsbestimmungen bei kurzlebigen Anfragen



Anzahl der Positionsübermittlungen bei kurzlebigen Anfragen



Anzahl der Nachrichten bei kurzlebigen Anfragen



Energieverbrauch der mobilen Objekte bei kurzlebigen Anfragen

Wegen der großen Zahl an Gebietspositionsanfragen, für die sich das Grid-Verfahren besonders eignet, ist es den anderen Verfahren bei mittleren und hohen Anfragelasten generell überlegen.

Erklärung

Hiermit versichere ich, diese Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen benutzt zu haben.

Stuttgart, den 6. September 2005 _____

(Ralph Lange)